

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**Інженерно-фізичний факультет**  
**Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії**

«На правах рукопису»

УДК 620.187:620.1

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Магістерська дисертація**  
**за освітньо-професійною програмою**  
**Комп'ютеризовані технології порошкової металургії**

зі спеціальності 136 МЕТАЛУРГІЯ

на тему: «Вплив вмісту нікелю на структуру і властивості остового аноду  
керамічної паливної комірки»

Виконав: магістрант, групи ФП-81мп  
Шеремет Семен Ігорович

\_\_\_\_\_

(підпис)

Науковий керівник: проф., д.т.н. Васильєв Олександр Дмитрович

\_\_\_\_\_

(підпис)

Консультант

з економічного розділу: доц., к.е.н. Петренко Катерина Валеріївна

\_\_\_\_\_

(підпис)

з розділу охорони праці: доц., к.т.н. Арламов Олександр Юрійович

\_\_\_\_\_

(підпис)

з нормконтролю: доцент, к.т.н., Бірюкович Ліна Олегівна

\_\_\_\_\_

(підпис)

Рецензент

\_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.

Магістрант

\_\_\_\_\_

(підпис)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет                      Інженерно-фізичний

Кафедра                        Високо температурних матеріалів та порошкової  
металургії

Рівень вищої освіти    другий (магістерський)

Напрямок підготовки    136 МЕТАЛУРГІЯ

Освітньо-професійна Програма  
Комп'ютеризовані технології порошкової  
металургії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В. о. завідувача кафедри

Мазур В. І. \_\_\_\_\_

(підпис)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

### ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію магістранту

Шеремету Семену Ігоровичу

1.     Тема дисертації: Вплив вмісту нікелю на структуру і властивості  
остового аноду керамічної паливної комірки

Науковий керівник: проф., д.т.н. Васильєв Олександр Дмитрович,  
затверджений наказом по університету від 12.11.2019 р. № 3890-с

2.     Строк подання студентом роботи    «20» Грудня 2019 року

3.     Вихідні дані до роботи

Аналіз сучасного стану виготовлення керамічних паливних комірок у цілому та аноду зокрема, визначення проблем експлуатації та виготовлення КПК.

Визначення шляхів для поліпшення їх властивостей

Дослідження пористого остову в міцністю не менше 100Мпа

Дослідження міцності провести з використанням методу двовісного згину.

Організаційно-економічні засади повинні забезпечувати нормативний коефіцієнт економічної ефективності не нижчий за 1,5.

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях при проведенні досліджень повинна відповідати нормативним вимогам.

Відповідність нормативним вимогам охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при проведенні досліджень.

4. Перелік питань, які належить розробити:

а.) Основний розділ

— Провести літературний огляд технології виготовлення керамічних паливних комірок визначити основні проблеми під час їх виготовлення та експлуатації. Визначення необхідних властивостей та методів їх поліпшення.

— Визначити вплив вмісту пороутворювача на поруватість остову та його механічну міцність. Обрати оптимальний вміст пороутворювача.

— Насичення виготовлених остовів солю нікелю

— Дослідження впливу ступеню насичення анодних остовів на його основні властивості.

— Обговорення результатів та формулювання висновків.

б.) розділ охорони праці та безпеки в надзвичайній ситуації:

— Визначення та аналіз шкідливих та небезпечних факторів при виготовленні зразків

— Розроблення заходів для попередження впливу шкідливих виробничих факторів.

— Заходи протипожежної безпеки

— Формулювання вимог безпеки в надзвичайних ситуаціях

в.) організаційно-економічна частина:

- техніко-економічне обґрунтування необхідності проведення науково-дослідної роботи згідно теми та визначення її економічної ефективності;
- розрахунок плану проведення досліджень;
- г.) розробка стартап-проекту
- Маркетинговий аналіз реалізації науково технічного рішення та його ринкового впровадження.

#### 5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Петренко Катерина Валеріївна, к.е.н., доцент		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Арламов Олександр Юрійович, к.т.н, доцент		

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Аналіз літературних даних щодо керамічних паливних комірок	07.09.2019	
2.	Вивчення методики дослідження властивостей, та виготовлення кераміки 3,5YSZ	14.09.2019	
3.	Дослідження впливу вмісту пороутворювача на поруватість зразків	20.10.2019	
4.	Насичення зразків нікелем та вивчення їх властивостей	01.12.2019	
5.	Розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	06.12.2019	
6.	Розрахунок економіки	10.12.2019	
7.	Обговорення отриманих результатів, оформлення дипломної записки та ілюстративного матеріалу	12.12.2019	

**Студент**

\_\_\_\_\_  
( підпис )

**Шеремет С.І.**

(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_  
( підпис )

**Васильєв О.Д.**

(прізвище та ініціали)

**Пояснювальна записка  
до магістерської дисертації**

**на тему: ВПЛИВ ВМІСТУ НІКЕЛЮ НА СТРУКТУРУ І  
ВЛАСТИВОСТІ ОСТОВОГО АНОДУ КЕРАМІЧНОЇ ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ**

Київ – 2019 року

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: стор. 79, рис. 20, табл. 18, літ. 36.

### КЕРАМІЧНА ПАЛИВНА КОМІРКА, АНОД, ПОРУВАТИСТЬ, ДІОКСИД ЦЕРКОНІЯ, НІКЕЛЬ, СТРУКТУРА, СПІКАННЯ

Мета роботи: розробка поруватого остову для аноду керамічної паливної комірки, насичення його солями нікелю та дослідження структури і властивостей насичених остовів.

Методи дослідження: холодне однобічне пресування, гідростатичне зважування, двовісний згин, відновлення у водні, скануюча електронна мікроскопія.

Предмет дослідження: Розроблення високопоруватого цирконієвого остову та дослідження впливу кількості нікелю на структуру і властивості насичених остовів.

Вдосконалення структури аноду керамічної паливної комірки проводили шляхом заміни традиційного методу виготовлення аноду з механічної суміші порошків  $\text{NiO-ZrO}_2$  остовим методом. Суть методу полягає в тому, що спочатку виготовляється високопоруватий цирконієвий остов, котрий в подальшому просочується солями нікелю. Перевагою методу є забезпечення рівномірного розподілу складових у структурі.

Для збереження необхідної, як для аноду-носія, міцності разом зі збільшеною поруватістю було проведено заміну традиційної керамічної складової 8YSZ (діоксид цирконію стабілізований 8-мол.% оксиду ітрію) більш міцною 3,5YSZ. Збільшення поруватості аноду має позитивно вплинути на підведення палива до місця реакції, що у свою чергу має збільшити ефективність роботи всієї керамічної паливної комірки.

Розроблено високопоруватий керамічний остов 3,5YSZ. Встановлено, що заміна 8YSZ на 3,5YSZ є прийнятною для виготовлення керамічної складової аноду-підкладки остовим методом. За однакової поруватості (38%) остови 3,5YSZ та 8YSZ мають міцність 92 та 38 МПа, відповідно.

Проведено насичення керамічних остовів солями нікелю.



## ABSTRACT

**Thesis work:** p. 79, fig.20, table.18, source 36.

SOLID OXIDE FUEL CELL, ANODE, POROSITY, ZIRCONIA OXIDE,  
NICKEL, STRUCTURE, SINTERING

Aim of work: development of a porous core for the anode of a ceramic fuel cell, saturation of its nickel salts and investigation of the structure and properties of saturated skeletons.

Research methods: cold uniaxial pressing, hydrostatic weighing, biaxial bending, reduction in hydrogen, scanning electron microscopy.

Subject of study: Development of highly porous zirconium scaffold and studying of the influence of nickel content on the structure and properties of saturated skeletons.

Improvement of the structure of the anode of the ceramic fuel cell was carried out by replacing the traditional method of making the anode from a mechanical mixture of powders  $\text{NiO-ZrO}_2$  by the skeletal method. The essence of the method is that a highly porous zirconium backbone is first manufactured, which is subsequently impregnated with nickel salts. The advantage of the method is to ensure a uniform distribution of components in the structure.

In order to preserve the strength required, as for the carrier anode, along with the increased porosity, the traditional ceramic component 8YSZ (zirconium dioxide stabilized 8 mol% yttrium oxide) was replaced by a more durable 3.5YSZ. Increasing the porosity of the anode should have a positive effect on the supply of fuel to the reaction site, which in turn should increase the efficiency of the entire ceramic fuel cell.

Highly porous 3.5YSZ ceramic skeleton developed. It has been found that the replacement of 8YSZ by 3.5YSZ is acceptable for the manufacture of a ceramic component of the anode substrate by the bypass method. With the same porosity (38%), the 3.5YSZ and 8YSZ skeletons have a strength of 92 and 38 MPa, respectively.

The saturation of ceramic skeletons with nickel salts was carried out.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	19
1.1. Загальна характеристика паливної комірки .....	19
1.2. Керамічна паливна комірка .....	23
1.3. Конфігурація КПК .....	25
1.4. Анод КПК та вимоги до нього .....	28
1.5. Матеріал аноду.....	29
1.6. Остова модель .....	33
1.7. Висновки та постановка завдання дослідження.....	34
2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	36
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ .....	42
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	50
4.1. Аналіз шкідливих та небезпечний факторів.....	50
4.2. Інженерні рішення для забезпечення безпеки технологічного процесу та запобігання дії шкідливих та небезпечний виробничих факторів .....	52
5. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	58
6. ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ .....	61
6.1. Науково-технічна актуальність НДР .....	61
6.2. Мета і завдання НДР.....	62
6.3. Розрахунок чисельності виробників та розрахунок заробітної плати ....	62
7. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	65
7.1. Розрахунок собівартості проведення дослідження .....	65
7.2. Визначення єдиного соціального внеску.....	65
7.3. Визначення вартості матеріалів для виконання НДР .....	65
7.4. Визначення інших прямих витрат.....	66
7.5. Визначення накладних витрат.....	66
7.6. Визначення планової кошторисної вартості НДР.....	67
7.7. Визначення та розрахунок показників економічної ефективності .....	68
8. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	73
ВИСНОВКИ .....	83

CONCLUSIONS.....	84
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

КПК – Керамічна паливна комірка

$\text{ZrO}_2^c$  – діоксид цирконію, стабілізований у кубічній фазі

8YSZ – діоксид цирконію стабілізований 8 мол.%  $\text{Y}_2\text{O}_3$

3,5YSZ – діоксид цирконію стабілізований 3,5 мол.%  $\text{Y}_2\text{O}_3$

## ВСТУП

Енергогенеруючі системи на основі КПК наразі знаходяться на демонстраційній стадії і вже довели можливість працювати безперервно протягом 5-6 років зі зниженням ефективності виготовлення електричної енергії 23% на рік. Не зважаючи на суттєвий прогрес в розробленні паливнокомірчаної технології, для подальшої широкої комерціалізації КПК у народному господарстві залишаються декілька перешкод, а саме: зниження робочої температури КПК до 600 °C із збереженням високої ефективності її роботи. Це дозволить збільшити номенклатуру матеріалів, які можуть бути застосовані для виготовлення енергосистеми на основі КПК, що, відповідно, зробить їх більш комерційно привабливими. Вирішення цих задач може проходити через розроблення нових матеріалів КПК та/або через структурну оптимізацію КПК в цілому. Ідеєю структурної оптимізації КПК є полегшення протікання електрохімічних реакцій в її складових, фактично, зниження поляризаційних втрат та омичного опору КПК. Очевидно, що вдосконалення будови складових КПК може бути здійснено через застосування більш прогресивних методів їх виготовлення.

Структура кожної зі складових КПК (електроліт, анод, катод) має бути вдосконалена, але для оцінки впливу оптимізації складових КПК на її ефективність роботи, необхідно провести системну роботу по встановленню впливу структури кожної зі складових на електричні властивості КПК. В рамках даної дипломної роботи планується проведення структурної оптимізації аноду, як носія всієї КПК. Окрім функції носія, анод відповідає за проходження електрохімічної реакції окиснення палива, відведення електричної енергії в зовнішню мережу та відведення продуктів реакції. Безумовно, вдосконалення структури традиційного нікель-цирконієвого аноду через оптимізацію розподілу складових, вмісту компонент та створення більш розвиненої мережі каналів пор для полегшення підведення і відведення палива дасть позитивний вплив на роботу аноду і всієї КПК.

## 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1. Загальна характеристика паливної комірки

Паливна комірка (ПК) це електрохімічний пристрій, який перетворює хімічну енергію палива в електричну і теплову, уникаючи при цьому багатостадійні процеси горіння, які відбуваються в традиційних енергогенеруючих пристроях з великими втратами [1,2]. Пряме перетворення хімічної енергії палива в електричну забезпечує підвищення загальної швидкості отримання енергії та ККД паливного елемента.

Одинична ПК складається з електроліту, що знаходиться між анодом і катодом, на які у свою чергу ззовні подається паливо та кисень відповідно. Таким чином за допомогою електрохімічного окислення палива та електрохімічного відновлення кисню генерується електрична енергія з виділенням побічних продуктів реакції: водяної пари та тепла.(рис. 1.1)

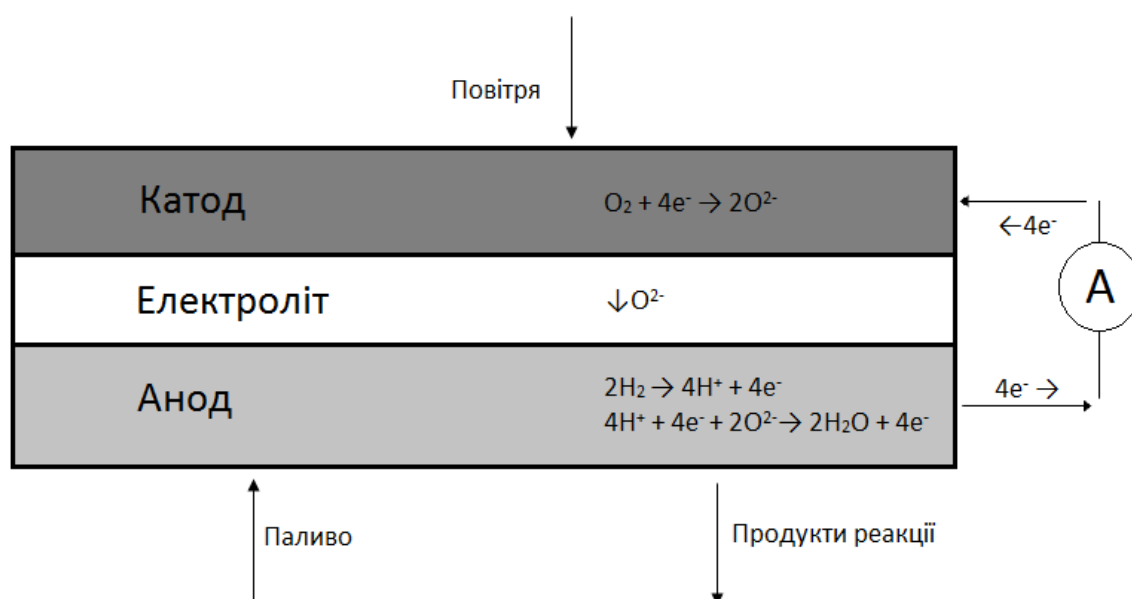


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення будови паливної комірки

Через те, що паливо на ПК подається ззовні, вони мають переваги у використанні та більший ресурс роботи на відміну від звичних гальванічних елементів.

Також до переваг паливних комірок у порівнянні з традиційними енергогенеруючими системами входять:

- відсутність шуму та вібрації,
- екологічність,
- висока автономність на низькі вимоги до обслуговування
- висока надійність та порівняно великий срок служби.

До недоліків паливних комірок можна віднести:

- відсутня воднева інфраструктура,
- відносно висока вартість виробництва.

За робочою температурою паливні комірки можна поділити на 3 групи [3]:

– Низькотемпературні – робоча температура до 100 °С. Іонними провідниками у даному типі комірок слугують водні розчини електролітів, матричні електроліти та іонообмінні мембрани.

– Середньотемпературні – працюють за температур 100-250°С.

Використовують у своєму складі розчини КОН або  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Задля запобіження випаровування розчинів застосовують збільшення робочого тиску або концентрації електроліту (до 98 % в масових долях);

– Високотемпературні – працюють за температур 500-1000 °С. Іонними провідниками є суміш розплавлених карбонатів ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaCO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) або тверді електроліти ( $\text{Zr}_{0.85}\text{Y}_{0.15}\text{O}_{1.925}$  та ін.).

На сьогоднішній день існують наступні типи паливних комірок:

- лужні ПК,
- протонообмінні (полімер-електролітні)ПК,
- фосфорно-кислотні ПК,
- розплав-карбонатні ПК,
- керамічні ПК.

Лужна паливна комірка є одним з різновидів низькотемпературних паливних комірок, електролітом в яких служить водний розчин гідроксиду калію (КОН). Їх ефективність вироблення електричної енергії складає близько 60%, а робоча

температура знаходиться в межах від 65 до 220 °С. Найбільш поширене їх застосування знайшли в космічній промисловості.

Переваги:

- можливість використання дешевих каталізаторів,
- широкий вибір конструкційних матеріалів,
- низька вартість електроліту,
- низька собівартість виробництва ПК,
- Недоліки:
- електроліт потребує періодичного поповнення,
- електроліт може викликати корозію,
- необхідність у використанні чистого кисню та водню,
- CO і CO<sub>2</sub> призводять до старіння електроліту.

Протонообмінна (полімер-електролітна) паливна комірка – один з різновидів низькотемпературних паливних комірок, електролітом в яких служить тонка полімерна мембрана яка проводить протони. Їх ефективність вироблення електричної енергії складає близько 60%, а робоча температура знаходиться в межах від 50 до 100 °С. Може використовуватись, в комунальному господарстві, сільському господарстві, транспортних засобах.

Переваги:

- компактність,
- велика щільність струму,
- низька робоча температура,
- довгий строк служби,
- швидкий пуск.

Недоліки:

- дорогий каталізатор,
- чутливий до CO,
- проблеми з охолодженням.

Фосфорно-кислотна паливна комірка є одним з різновидів середньотемпературних паливних елементів, електролітом в яких служить фосфорна



кислота ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Їх ефективність вироблення електричної енергії складає близько 40%, а робоча температура знаходиться в межах від 150 до 200 °С. Вони можуть використовуватись в портативних установках, а також в транспортних засобах.

Переваги:

- висока стабільність при робочих температурах,
- $\text{CO}_2$  не впливає на електроліт і роботу паливної комірки,
- проста конструкція,
- низький ступінь летючості електроліту.
- Недоліки:
- пальне не повинне містити газ  $\text{CO}$ , який отруює каталізатор,
- низький ККД  $\sim 40\%$ ,
- дорогий каталізатор,
- обмежений термін служби.

Розплав-карбонатна паливна комірка є одним з різновидів високотемпературних паливних елементів, електролітом в яких служить розплавлений карбонат (сіль натрію або літію). Їх ефективність вироблення електричної енергії складає близько 60%, а робоча температура коливається в межах від 600 до 700 °С. Може використовуватись у великих стаціонарних установках.

Переваги:

- не потребує дорогих каталізаторів,
- не вимагають наявності реформера,
- в якості палива може використовуватися ряд натуральних і синтетичних

палив.

Недоліки:

- чутливий до домішки  $\text{H}_2\text{S}$ ,
- тривалий час запуску,
- високі температури призводять до корозії і прискорення процесу зношування елементів.

## 1.2. Керамічна паливна комірка

Не дивлячись на наявність різних видів ПК - найбільш перспективним типом ПК на сьогодні є керамічні паливні комірки.

Керамічна паливна комірка (КПК) є високотемпературною ПК оскільки через використання твердого електроліту мають робочу температуру 600-1000 °С. КПК мають переваги у використанні над традиційними енергогенеруючими пристроями та іншими типами паливних комірок завдяки їх ефективності, вищій екологічній безпеці, надійності, гнучкості вибору палива ( $H_2$ ,  $C_mH_n$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ). Їх ефективність вироблення електричної енергії складає близько 70%. При використанні супутнього тепла – зальний ККД може досягати 95% [2]. На сьогодні використання КПК обмежується стаціонарним застосуванням через відносно велику вагу.

Класична КПК складається з твердого оксидного електроліту, оточеного поруватими анодом і катодом.

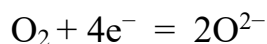
Самим поширеним матеріалом електроліту є стабілізований у кубічній фазі діоксид цирконію ( $ZrO_2$ ) завдяки його високій іонній провідності, механічній і хімічній стабільності при робочих температурах 600-1000 °С, а також через його відносно не високу вартість.[2]

Анод найчастіше виготовляють з  $Ni-YSZ$ , катод з  $LaSrMnO_3-YSZ$ . Додавання матеріалу електроліту до складу електродів зумовлено необхідністю наблизити значення коефіцієнту термічного розширення до значень електроліту.

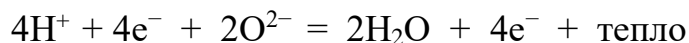
Основою роботи КПК є електрохімічне окиснення палива і електрохімічне відновлення кисню. На катод подається кисень, де він відновлюється. Іони кисню рухаються крізь щільний керамічний електроліт (іонний провідник) від катода до анода. В свою чергу, на анод подається водень, де каталізатор (металічний нікель) сприяє його дисоціації на атоми. При окисненні водню останній звільняє електрони в зовнішнє електричне коло, при цьому утворюється вода, реакція утворення води є екзотермічною. В результаті у зовнішньому електричному колі тече постійний електричний струм.

При подачі палива та окиснювач (водень та кисень), відповідно на анод і катод, то відбуваються наступні електрохімічні реакції:

На катоді проходить реакція відновлення кисню:



На аноді відбувається окиснення палива:



Сумарною реакцією, яка проходить у КПК, є реакція окиснення водню:



Рух іонів кисню з катоду до аноду через щільний керамічний електроліт пояснюється градієнтом концентрації кисню по різні боки електроліту. Електрорушійна сила між електродами описується рівнянням Нернста (1.1), яке показує, що рух електронів з аноду до катоду є прямо пропорційним різниці хімічних потенціалів по кисню між електродами.

$$E = \frac{RT}{2F} \cdot \ln \frac{P_{\text{O}_2(k)}^{1/2}}{P_{\text{O}_2(a)}^{1/2}}, \quad (1.1)$$

де  $E$  – електрорушійна сила;

$R$  – газова константа;

$T$  – абсолютна температура;

$F$  – константа Фарадея;

$P_{\text{O}_2(a)}$  - парціальний тиск кисню на аноді;

$P_{\text{O}_2(k)}$  - парціальний тиск кисню на катоді.

Наприклад, при використанні в КПК повітря як окисника і водню як палива  $P_{\text{O}_2(k)}$  буде дорівнювати парціальному тиску  $\text{O}_2$  в повітрі, а  $P_{\text{O}_2(a)}$  буде зумовлюватись парціальними тисками  $\text{H}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  –  $P_{\text{H}_2(a)}$  і  $P_{\text{H}_2\text{O}(a)}$ , відповідно.

У такому випадку рівняння Нернста буде мати вигляд:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \cdot \ln \frac{P_{O_2(k)}^{1/2} \cdot P_{H_2(a)}}{P_{H_2O(a)}},$$

де  $E_0$  – дорівнює  $\Delta G^\circ/2$ ;

$\Delta G^\circ$  – енергія Гіббса для реакції окиснення водню при робочій температурі комірки.

КПК можуть застосовуватися у багатьох галузях суспільства. В побуті як стаціонарні незалежні енергетичні установки потужністю 100 Вт – 10 кВт. Наразі найпоширеніше застосовуються великі стаціонарні енергетичні установки потужністю 1 мВт та більше, для забезпечення незалежного або аварійного живлення підприємств та корпорацій. Мобільні джерела живлення для використання різних видах транспорту також є перспективним, але для діючої реалізації таких КПК потрібне вдосконалення існуючих або розроблення нових матеріалів складових задля суттєвого зниження ваги.

### 1.3. Конфігурація КПК

На сьогодні розроблені та реалізовані декілька концепцій паливних систем, що відрізняються один від одного геометричною конструкцією окремих елементів, матеріалами з'єднувача і способом подачі газового потоку. Найбільшого поширення серед систем КПК отримала трубчаста і плоска конструкції [4].

Трубчаста система має вигляд циліндра з наскрізним отвором вздовж осі та складається з катодної та анодної керамічних трубок, між якими розташовується твердий електроліт, а також інтерконектор (струмознімач) який служить біполярним розділювачем, що з'єднує анод і катод в трубчастій системі. Паливо подається ззовні трубки, а повітря зсередини, відповідно схемі(рис 1.2) [5-7].

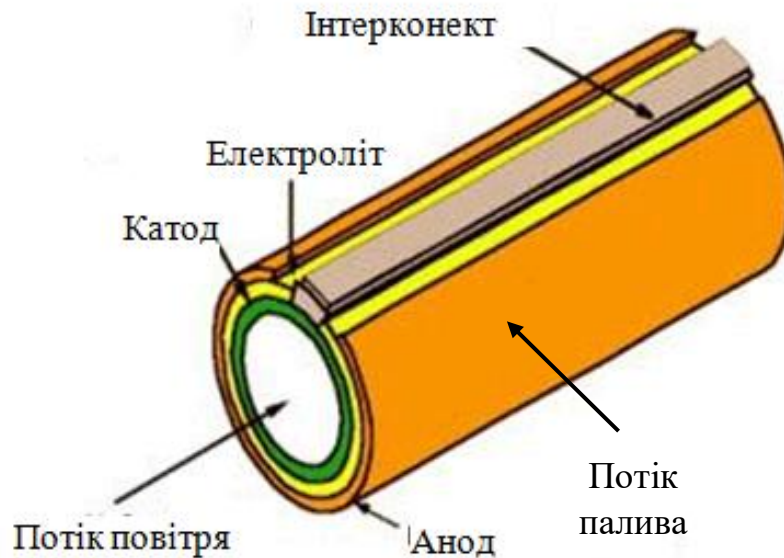


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення трубчастої КПК [2]

З точки зору легкості та зручності виробництва більш поширені є плоскі КПК, яки складаються зі з'єднаних пластин анода, катода та електроліту. Окремі комірки з'єднуються інтерконектом, який має пази для підведення кисню та палива, та слугує струмознімачем. (рис 1.3) Завдяки можливості формування блоків з багатьох комірок плоска форма також вигідніша за параметрами компактності та потужності. [8].

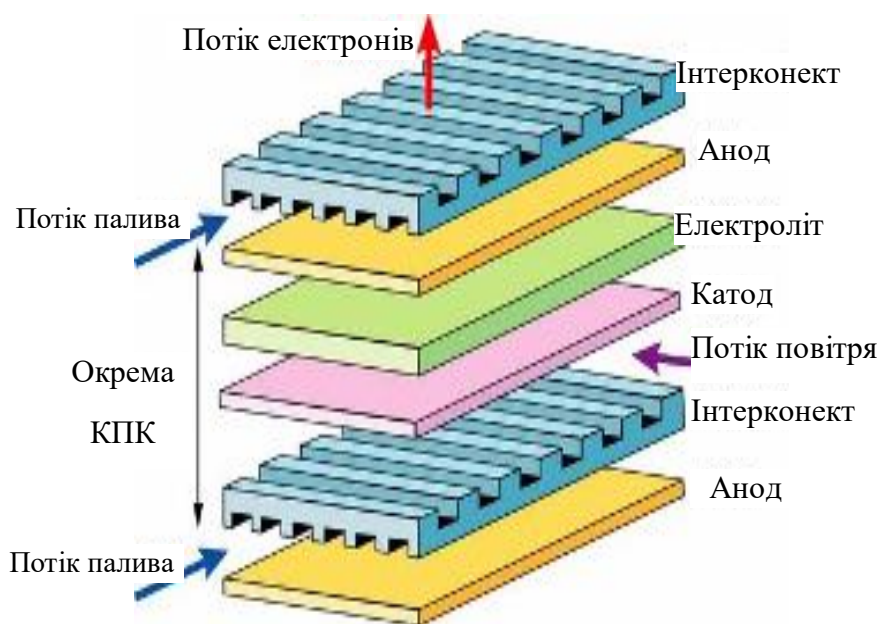
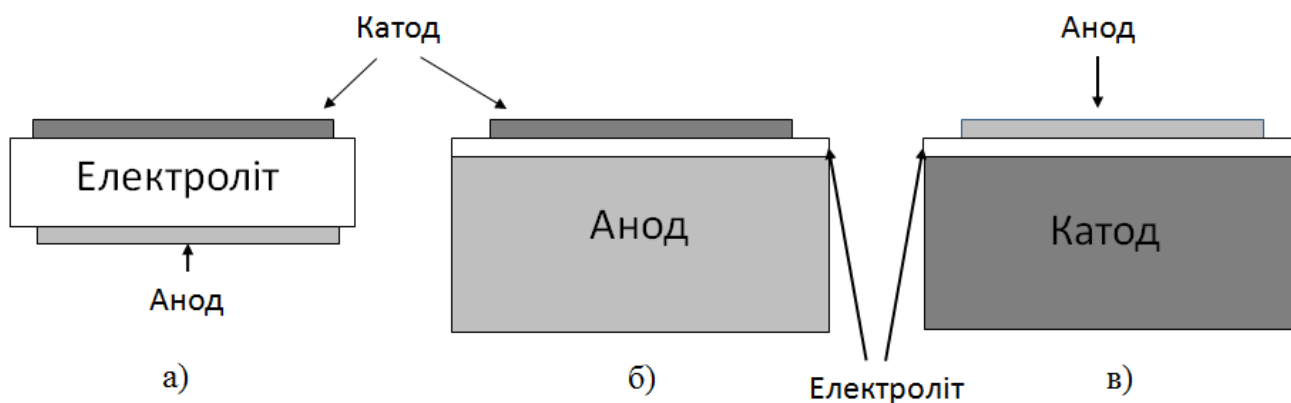


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення плоскої КПК [2]

У кожній з конструкцій, КПК можуть виготовлятися у трьох конфігураціях: на електроліті, або одному з електродів (аноді або катоді), в залежності від основної складової, котра забезпечує механічну міцність всієї конструкції (рис. 1.4).



а) – на основі електроліту; б) – на основі аноду; в) – на основі катоду

Рисунок 1.4 – Конфігурації плоских КПК

Електроліт рідше застосовують як механічну основу КПК тому що, товщина таких електролітів (50-150 мкм) зумовлює значне збільшення омичного опору та підвищення робочої температури. У КПК з електродним носієм електролітний шар має товщину 7-20 мкм, що значно зменшує омичний опір і дозволяє знизити робочу температуру нижче 800 °С.

При збільшенні товщини катодного шару також буде зростати електричний опір КПК, що в свою чергу також буде вимагати підвищення її робочої температури.

Тому зазвичай плоскі КПК будують на основі аноду [9]. Це обумовлено намаганням максимально зменшити омичний опір шарів електроліту та катоду через їхнє стоншення, що є надзвичайно критичним для зниження робочої температури КПК. Відповідно, анод має мати достатню міцність (~100 МПа) як для полегшення роботи з ним під час виготовлення усієї комірки, так і для забезпечення її стабільної роботи [10].

#### 1.4. Анод КПК та вимоги до нього

Основна роль аноду в КПК – забезпечення місця для реакції газоподібного палива з іонами кисню, які постачаються через електроліт, та підведення палива і відведення продуктів реакції окиснення палива назовні [2,9].

Високі робочі температури та відновне середовище в якому знаходиться анод, накладають доволі жорсткі обмеження щодо використовуваних матеріалів.

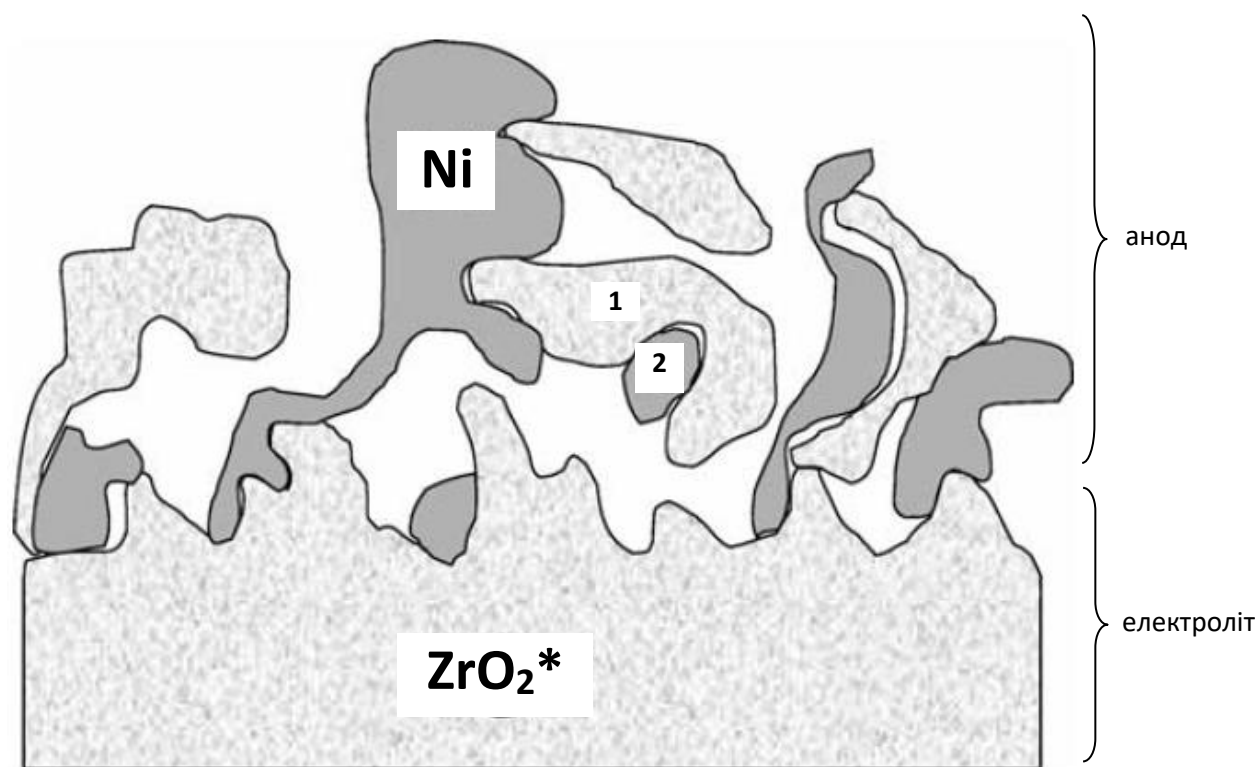
Матеріал аноду має задовольняти певним взаємовиключним вимогам, а саме:

- мати достатній рівень міцності, особливо у конфігурації з анодом-носієм;
- демонструвати змішану електронно-іонну провідності;
- мати високу каталітичну активність щодо окиснення палива;
- має забезпечувати зв'язну мережу порових каналів;
- мати сумісність коефіцієнту термічного розширення (КТР) з прилеглими;
- бути хімічно стабільним у відновному середовищі;
- легкий у виготовленні та відносно дешевий.

Електрохімічна реакція окиснення палива відбувається лише на межі трьох фаз – місці, де іонний провідник, електронний провідник (каталізатор) та пора зустрічаються [8]. Схематично межа трьох фаз між анодом  $\text{Ni-ZrO}_2$  і електролітом  $\text{ZrO}_2$  наведена на рисунку 1.5.

При розриві зв'язності однієї з цих фаз електрохімічна реакція не буде проходити. Місце реакції перестає приймати участь у корисній дії паливної комірки, якщо:

- іони з електроліту не можуть підійти до місця реакції;
- молекули газоподібного палива не можуть підійти до місця реакції;
- електрони не можуть бути відведені назовні.



1 – частинка  $ZrO_2с$  є неактивною через неможливість надходження до неї іонів кисню з електроліту;

2 – частинка  $Ni$  є неактивною через неможливість відведення з неї електронів.

Рисунок 1.5 - Схематичне зображення межі трьох фаз  $Ni-ZrO_2с$ -пора в аноді КПК [8].

Невідповідність коефіцієнтів термічного розширення компонентів, утворення нових фаз і стехіометричні перебудови можуть створювати внутрішні напруження в аноді і призводити до його руйнування. Також важливою є і структурна стабільність складових аноду – спікання частинок матеріалу аноду під час роботи КПК призводить до зменшення його реакційної зони. Мікроструктура аноду повинна залишатися незмінною протягом всього строку роботи КПК.

### 1.5. Матеріал аноду

На початку 20-х років XX ст. вивчалось багато матеріалів для виготовлення аноду, а саме платина, перехідні метали (залізо, кобальт і нікель), графіт. Але кожний окремо взятий матеріал не міг забезпечити надійність аноду в умовах роботи. Платина – дорогоцінний матеріал. Залізо окислюється при робочих температурах. Кобальт більш стабільний, проте відносно дорогий. Нікель



демонструє найвищі значення електрохімічної активності, щодо окиснення водню [11]. Окрім цього, нікель є дешевшим, в порівнянні з кобальтом та платиною. Це у свою чергу робить нікель більш економічно доцільним для використання в якості анодного матеріалу.

Проте, основним недоліком металевго нікелю є його низька температура плавлення ( $1455\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), що може викликати укрупнення його частинок під виготовлення аноду та роботи КПК. Більш того, нікель демонструє значну несумісність КТР з традиційним електролітним матеріалом -  $\text{ZrO}_2^{\circ}$ . Так КТР для металевго нікелю і  $\text{ZrO}_2^{\circ}$  дорівнює  $\sim 13,3 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$  і  $\sim 11 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ , відповідно [12]-[14]. Отже, використання окремо нікелю в якості аноду КПК може спричиняти деградацію властивостей КПК та навіть її руйнування в результаті розтріскування.

Вперше, в 1964 р., Спесіл (США) [15] запропонував використати композиційний матеріал на основі  $\text{ZrO}_2^{\circ}$  і  $\text{Ni}$  для виготовлення аноду. Вміст нікелю в аноді і забезпечує його електронну провідність та каталітичну активність щодо окиснення палива. Такий анодний кермет  $\text{Ni-ZrO}_2^{\circ}$  вирішував проблему агрегації металевго складової аноду при його високих робочих температурах через значну його коалесценцію і досить низькі адгезійні властивості нікелевого аноду до електроліту (низьку змочуваність).

З 1964 р. цей композит стає найпоширенішим анодним матеріалом, який і зараз не втрачає своєї привабливості [16] через свою відносно низьку вартість, досить високу хімічну стабільність і високі каталітичні властивості щодо окиснення водню і конверсії вуглеводневих палив [17]. Що ж до керамічної складової аноду, то не дивлячись на те, що сьогодні розглядається багато нових електролітних матеріалів із високою іонною провідністю.[18], [19],  $\text{ZrO}_2^{\circ}$  залишається найпопулярнішим через свою високу стабільність у відновному і окисному середовищах, достатньо високу міцність і відносно низьку вартість.

Керамічна складова  $\text{ZrO}_2^{\circ}$ , котра використовується для виготовлення композиційних анодів, зазвичай стабілізується оксидом ітрію, хоча стабілізація його дорожчими оксидами скандію і ітербію забезпечує його більшу іонну провідність

[17] (рис. 1.6). Також використання композиційного аноду знижує розбіжність коефіцієнтів термічного розширення з електролітом.

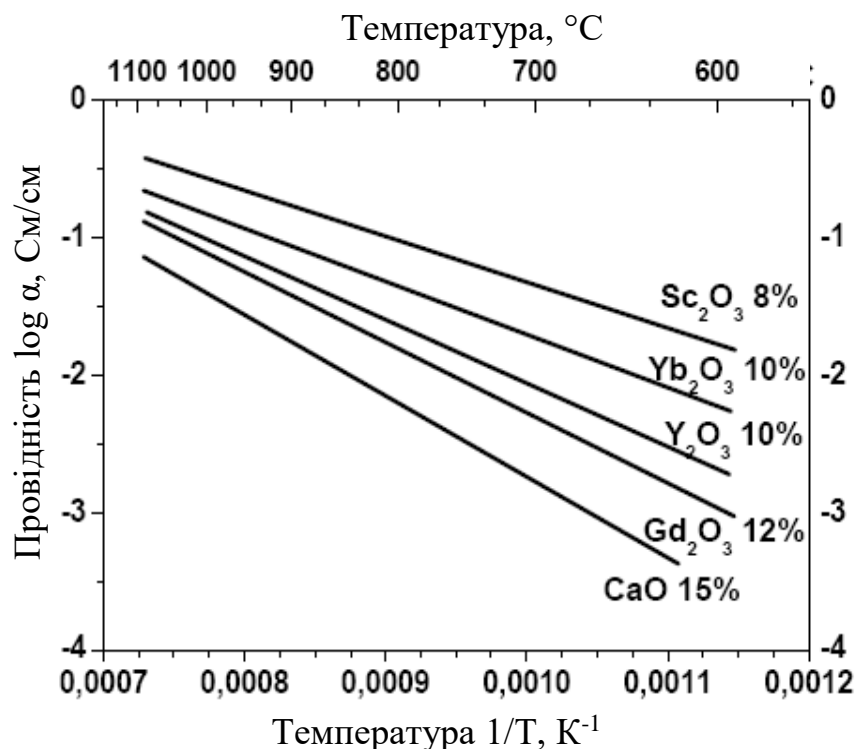


Рисунок 1.6 – Температурна залежність іонної провідності кераміки  $ZrO_2$ , стабілізованої різними оксидами, мол. % [17]

Введення певної кількості стабілізуючої добавки збільшує іонну провідність діоксиду цирконію за рахунок утворення кисневих вакансій, по яких рухаються іони кисню. Забезпечення високої іонної провідності є однією з основних вимог при виборі матеріалу аноду, оскільки іонна провідність забезпечує поширення місця електрохімічної реакції в глиб аноду.

Крім того, кількість та тип стабілізуючої добавки обумовлюють міцність кераміки на основі діоксиду цирконію.

Тому важливим питанням є вибір стабілізатора та його концентрація. На рисунку 1.7 зображено графік, який відображає вплив різних стабілізуючих компонентів на властивості матеріалу.

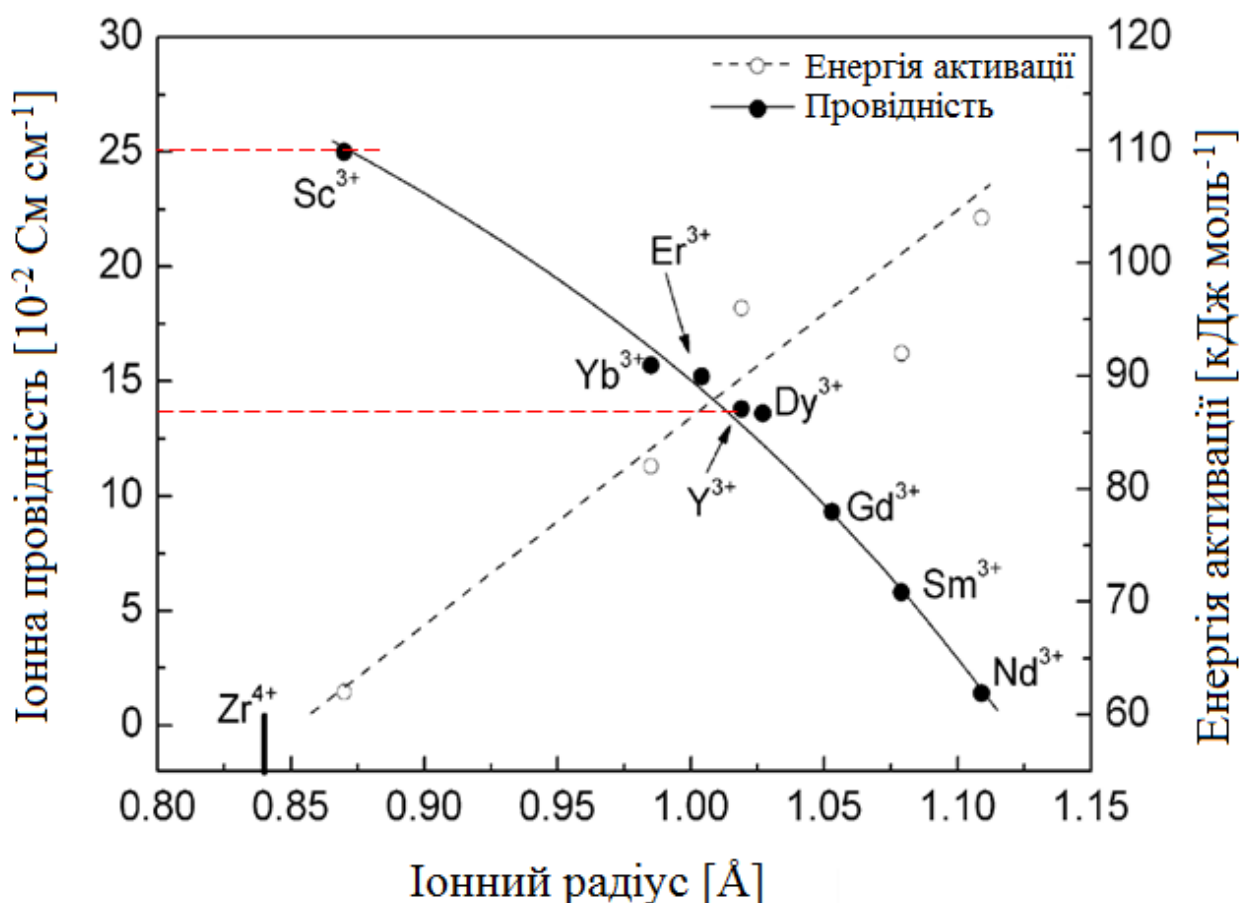


Рисунок 1.7 – Вплив стабілізаторів на властивості матеріалу електроліту [24]

Мобільність кисневих іонів, а отже й провідність, в градці електролітів залежить від їх кластерної асоціації, дефектності решітки, а також від іонного радіусу домішкового іону. Чим більше іонний радіус домішкового іону подібний до іонного радіусу Zr<sup>4+</sup> ( $r_{\text{іон}} = 0,84 \text{ Å}$ ), тим вищу провідність демонструє даний склад. Так цирконія, легована Sc ( $r_{\text{іон}} = 0,87 \text{ Å}$ ), показує вищу провідність ніж легована Y ( $r_{\text{іон}} = 1,02 \text{ Å}$ ) або ж Gd ( $r_{\text{іон}} = 1,06 \text{ Å}$ ).

Крім того, кількість та тип стабілізуючої добавки обумовлюють міцність кераміки на основі діоксиду цирконію. Саме керамічна складова забезпечує механічну міцність аноду. Нікель та поруватість лише її зменшують.

Вплив стабілізуючого елемента та його концентрації на зміну міцності відображено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Міцність матеріалів на основі діоксиду цирконію [2]

Склад матеріалу	Міцність при вигині, МПа
$\text{ZrO}_2 - 3 \text{ мол. \% } \text{Y}_2\text{O}_3$	1200
$\text{ZrO}_2 - 8 \text{ мол. \% } \text{Y}_2\text{O}_3$	230
$\text{ZrO}_2 - 8 \text{ мол. \% } \text{Sc}_2\text{O}_3$	270
$\text{ZrO}_2 - 11 \text{ мол \% } \text{Sc}_2\text{O}_3$	255
$\text{ZrO}_2 - 11 \text{ мол \% } \text{Sc}_2\text{O}_3 - 1 \text{ мол \% } \text{Al}_2\text{O}_3$	250

Як видно з таблиці, використання 3YSZ (діоксиду цирконію стабілізованого 3 мол.% оксиду ітрію ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ )) у якості стабілізатора цирконієвої кераміки, демонструє найвищий рівень міцності зразків

### 1.6. Остова модель

Зазвичай композиційний анод  $\text{Ni-ZrO}_2^c$  виготовляють з суміші порошків  $\text{NiO}$  та  $\text{ZrO}_2^c$ . Використання  $\text{NiO}$  замість  $\text{Ni}$  обумовлено тим, що, як показано в роботах [21], [22], ефективність і тривалість роботи аноду збільшуються при виготовленні його не з порошку металевого нікелю, а з його оксиду, який у процесі першого запуску КПК відновлюється до  $\text{Ni}$ . Крім того, використання  $\text{NiO}$  значно полегшує процес виготовлення аноду через вищу температуру плавлення оксиду, порівняно з металевим нікелем, та можливість спікання аноду на повітрі. В роботі [23] показано, що збільшення температури відновлення сприяє збільшенню електропровідності, що може бути результатом утворенням зв'язної мережі нікелю при вищих температурах через перерозподіл щойно сформованого поверхнево активного металу. Стадія відновлення нікелю є надзвичайно важливою, оскільки саме на цій стадії формується кінцева структура аноду, яка власне визначає його властивості.

Як зазначалось раніше, важливим під час формування структури аноду є отримання суцільності та зв'язаності усіх фаз (нікелевої, цирконієвої та поруватості), оскільки при втратах їх зв'язаності знижується ефективність роботи

усієї комірки. Слід відмітити, що при виготовленні анодів з суміші порошків, важко досягти рівномірного розподілу складових у об'ємі матеріалу, щоб забезпечити йому високий рівень міцності, каталітичних і електричних властивостей одночасно.

Альтернативним методом формування структури анодів є остовий метод [24]-[26]. Суть методу полягає в тому, що спочатку виготовляється високопоруватий цирконієво-керамічний остов, котрий у подальшому просочується сіллю нікелю (рис.1.8). В даному випадку можливо досягти більш рівномірного розподілу нікелю, що у свою чергу може сприяти можливості зниження вмісту нікелю для забезпечення електропровідності. Більш того, міцність таких анодів є незмінною при відновленні нікелю, оскільки забезпечується керамічним остовом.

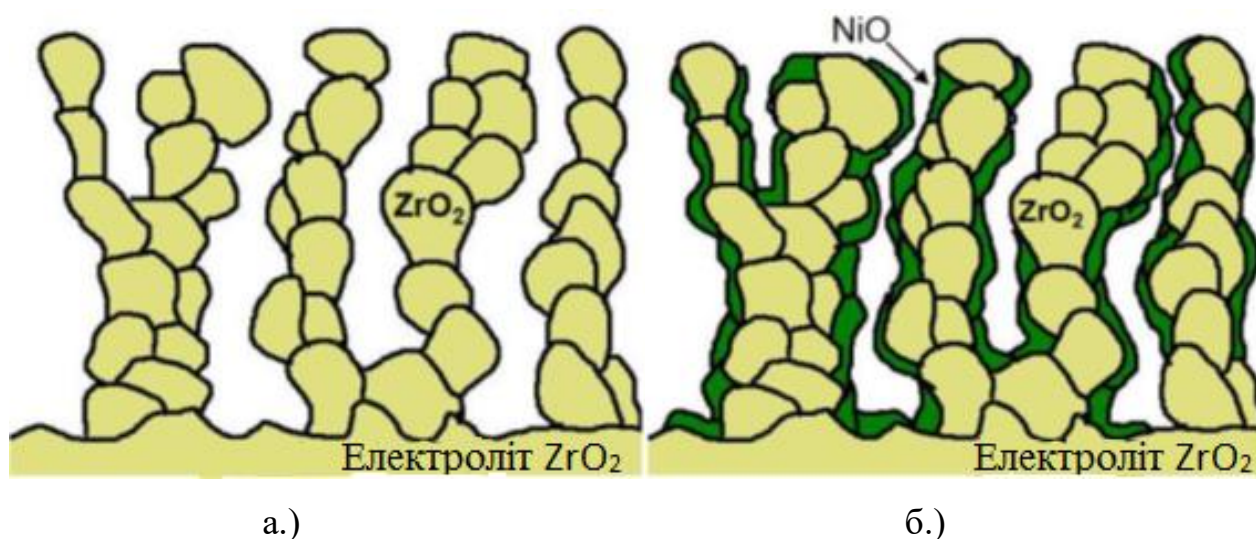


Рис. 1.8 Схематичне зображення структур: а.) пористого остову  $ZrO_2$  та б.) остову насиченого солями нікелю.[24]

### 1.7. Висновки та постановка завдання дослідження

Проведений аналіз літературних даних дозволяє сформулювати стан розвитку сучасних матеріалів анодів КПК, вимог до них, а також тенденції їхнього вдосконалення.

На сьогодні, традиційним вважається анод Ni-8YSZ. Зазвичай, такі аноди виготовляють пресуванням суміші порошків NiO та 8YSZ. Проте, даний метод має низьку продуктивність, і як правило застосовується лише для виготовлення

лабораторних зразків. У зв'язку із цим постійно проводиться розроблення нових та вдосконалення існуючих методів виготовлення складових КПК.

У зв'язку із цим, в роботі пропонується альтернативний метод виготовлення анодів керамічної паливної комірки – остовий метод. Суть методу полягає в тому, що спочатку виготовляється високопоруватий керамічний остов, котрий в подальшому просочується солями нікелю. В даному методі можливо досягти більш рівномірного розподілу складових у структурі.

Робота присвячена розробленню високопоруватого керамічного остову. Даний керамічний остов, фактично, є складовою аноду-підкладки КПК. В роботі запропонована заміна традиційної керамічної складової 8YSZ більш міцною 3,5YSZ. Використання 3,5YSZ має зберегти необхідний рівень міцності підкладки з підвищеною поруватістю. За результатами роботи буде обрано остов з оптимальними властивостями для подальшого просочування його нікелем, та досліджено вплив кількості нікелю на поруватість, міцність, провідність та структуру насичених керамічних остовів. Вдосконалення структури аноду керамічної паливної комірки має поліпшити протікання реакції на аноді і, відповідно, покращити ефективність роботи усієї КПК.

Таким чином, на дипломну роботу було поставлено наступні завдання:

- Розробити керамічний остов з високим рівнем поруватості та збереженням достатньої механічної міцності. Для зміни поруватості керамічних остовів до вихідних матеріалів додавати крохмаль в якості пороутворювача.
- На основі отриманих результатів обрати оптимальний склад для подальшого насичення його солями нікелю.
- Дослідити вплив кількості циклів просочування остовів солями нікелю на вміст нікелю в них
- Дослідити механічну міцність та електричну провідність насичених остовів.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для виготовлення керамічних остовів використовували порошок діоксиду цирконію, стабілізованого 3,5 мол.% оксиду ітрію (3,5YSZ) виробництва ТОВ «Цирконія України», Україна (рисунок 2.1). Зміну поруватості остовів забезпечували введенням різної кількості пороутворювача. В якості пороутворювача використовували сферичний крохмаль Таріоса виробництва Thai World Import & Export Co., Ltd., Thailand (рисунок 2.2). Сферична форма пороутворювача обрана для мінімізації негативного впливу його форми на мікроструктуру остову, а саме утворення гострих кутів, та рівномірнішого розподілу пор.

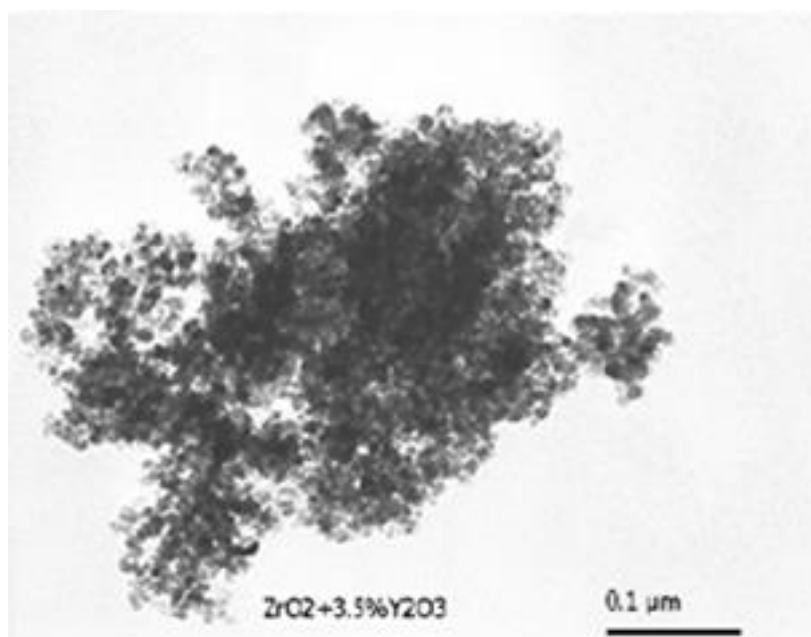


Рисунок 2.1 – ТЕМ зображення порошку двоокису цирконію 3,5YSZ

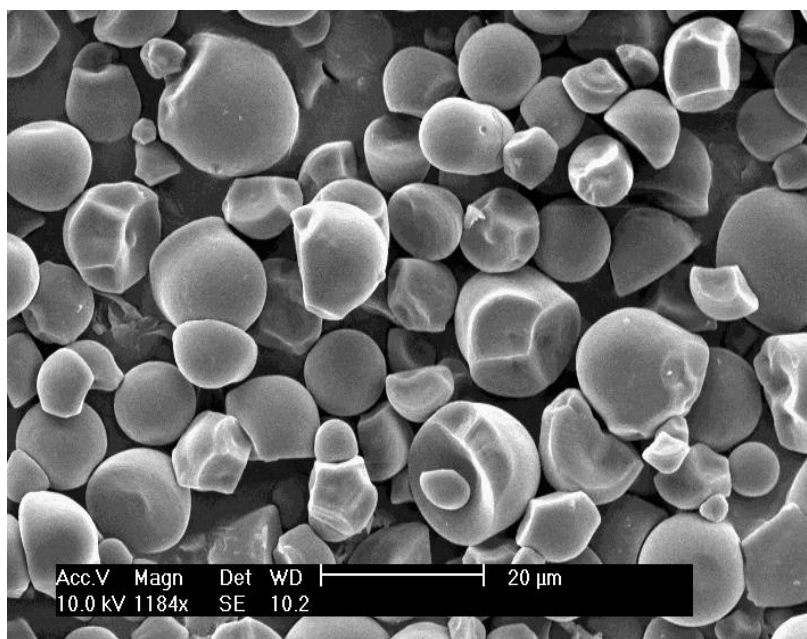


Рисунок 2.2 – СЕМ зображення порошку крохмалю

Для встановлення залежності міцності керамічних остовів від їх поруватості, у порошок 3,5YSZ додавали: 3-, 5-, 7-, 10-, 15-, 20-, 25-, 30-, 35-мас. % крохмалю, що в перерахунку на об'ємні відсотки становило: 10-, 16-, 22-, 29-, 42-, 51-, 58-, 64-, 69-об. %.

Перед виготовленням зразків, порошки були подрібнені і змішані в барабанному млині у спирті з використанням цирконієво-керамічних розмельних тіл упродовж 24 годин. Після змішування порошки були висушені для видалення вологи, та просіяні через сито 0,1 мм з метою недопущення крупних агломератів.

По 6 дискових зразків з кожної партії порошкової суміші (всього 54 зразки), діаметром 20 мм і товщиною (1,76-2,72 мм), було виготовлено на гідравлічному пресі, однобічним холодним пресуванням в сталевій прес-формі при тискові пресування 64 МПа. Спресовані зразки спікали у печі Linn High Term марки VMK1600 при температурі 1400 °С зі швидкістю нагрівання 200 °С/год. Тиск пресування та температуру спікання було обрано на основі попередніх досліджень обраного порошку. Загальну технологічну схему виготовлення зразків наведено на рисунку 2.3.



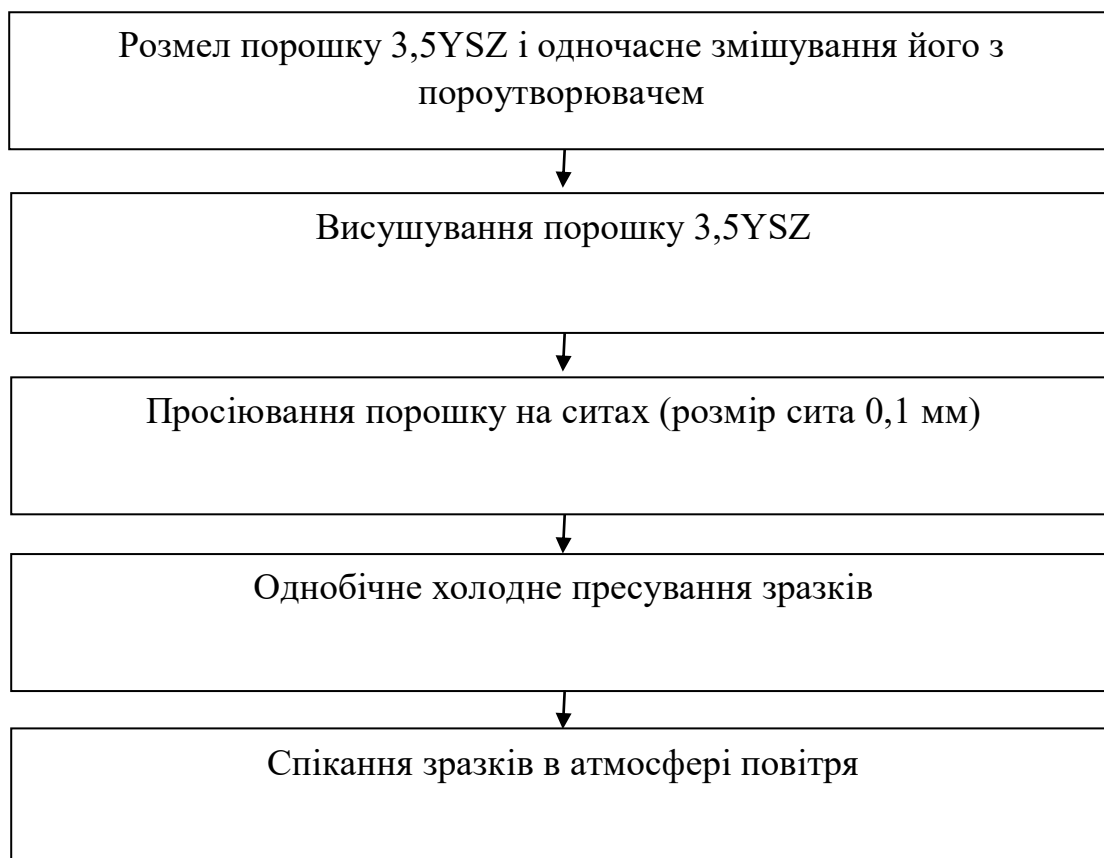


Рисунок 2.3 – Технологічна схема виготовлення пористої кераміки складу 3,5YSZ з використанням пороутворювача

Поруватість спресованих зразків розраховано за геометричними розмірами та масою наважки з урахуванням маси пороутворювача, поруватість спечених зразків — за допомогою гідростатичного зважування [27].

Відкрити (уявну) поруватість ( $\Pi_B$ ), %, розраховували за рівнянням:

$$\Pi_B = [(m_3 - m_1)/(m_3 - m_2)] \cdot 100\%,$$

де  $m_1$  — маса сухого зразка при зважуванні на повітрі, г;

$m_2$  — маса зразка, насиченого рідиною при зважуванні у воді, г;

$m_3$  — маса зразка, який насичено рідиною при зважуванні на повітрі, г;

Загальну поруватість ( $\Pi_{\text{заг}}$ ), %, зразків розраховували за рівнянням:

$$\Pi_{\text{заг}} = (1 - \rho_1/\rho_2) \cdot 100\%,$$

де  $\rho_1$  — відносна щільність зразка, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_2$  — теоретична щільність матеріалу, г/см<sup>3</sup>, (у випадку 3,5YSZ — 6,14 г/см<sup>3</sup>)

Відносну щільність зразка розраховують за рівнянням:

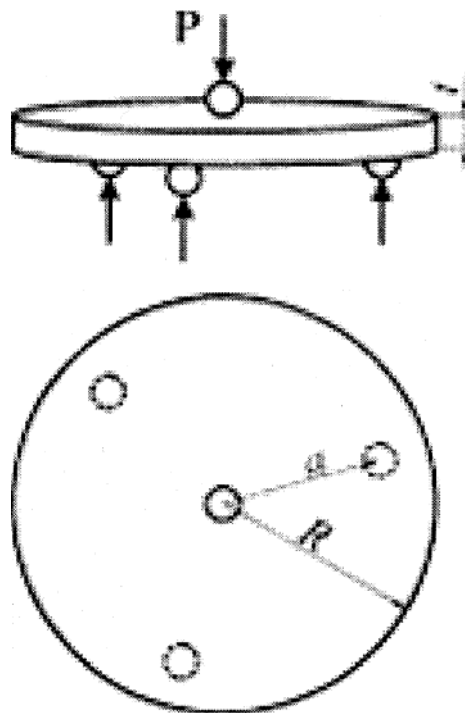
$$\rho_1 = [m_1/(m_3 - m_2)] \cdot \rho_3,$$

де  $\rho_3$  — щільність насичуючої рідини, г/см<sup>3</sup>.

Закриту поруватість ( $\Pi_3$ ), %, зразків розраховували за рівнянням:

$$\Pi_3 = \Pi_{\text{заг}} - \Pi_{\text{в}},$$

Зразки випробували на міцність методом двовісного згину за схемою “кулька на три кульки” при кімнатній температурі. Схему навантаження зображено на рисунку 2.4.



$P$  — тиск навантаження;  $R$  — радіус зразка;  $a$  — радіус шарів;  $t$  — товщина зразка

Рисунок 2.4 – Схема навантаження[28]

Відповідно до робіт [28, 29], максимальне напруження руйнування  $\sigma_{\max}$  розраховували за рівнянням (2.1). Це рівняння можна використовувати для дискових зразків при співвідношенні товщини до радіусу  $>0,05$  [28]. Фактор форми спечених зразків дозволяє використовувати рівняння (2.1) для розрахунку міцності:

$$\sigma_{\max} = \frac{3F(1+\nu)}{4\pi t^2} \left[ 1 + 2 \cdot \ln \frac{R_a}{b} + \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)} \cdot \left( 1 - \frac{b^2}{2R_a^2} \right) \cdot \frac{R_a^2}{R^2} \right], \quad (2.1)$$

де  $F$  — навантаження, Н;

$\nu$  — коефіцієнт Пуассона, який дорівнює  $\sim 0,25$ ;

$\pi$  — константа Піфагора (3,14);  $t$  — товщина зразка, мм;

$b$  — ефективний радіус контакту в точці навантаження, який дорівнює  $t/3$ ;

$R_a$  — радіус підтримуючого кола з кульок, який дорівнює 5 мм;  $R$  — радіус зразка, мм.

Наступним етапом роботи було введення нікелю в керамічні остови. Загальна операційна схема введення нікелю в остов з 3,5YSZ представлена на рис. 2.5

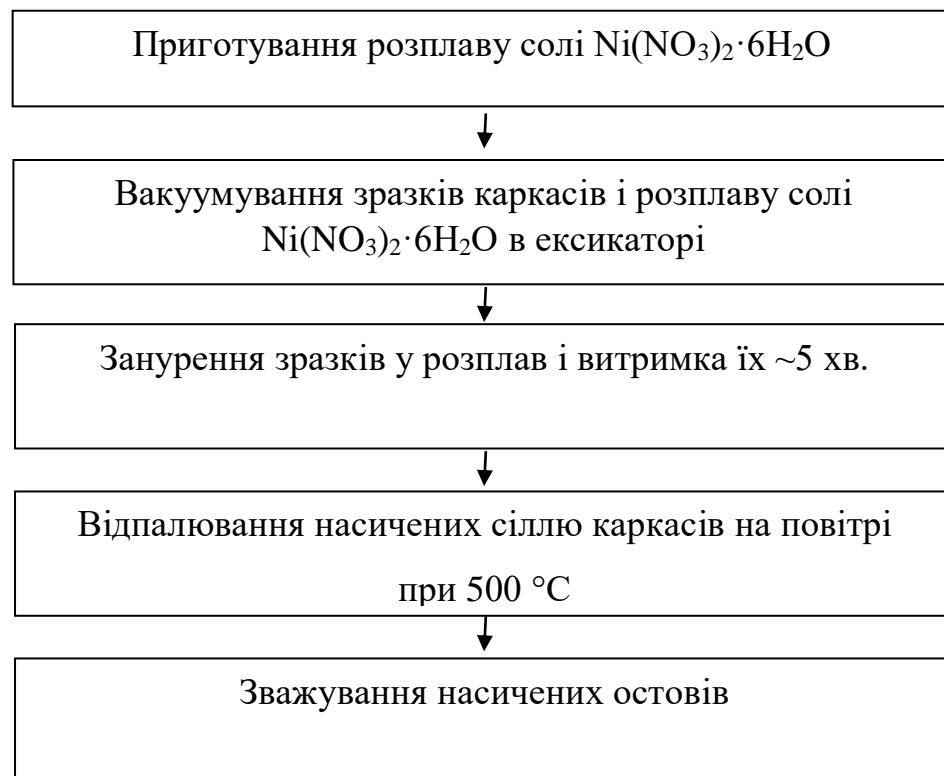


Рисунок 2.5 - Загальна операційна схема методики просочування  
каркасів 3,5YSZ.

Пористі каркаси 3,5YSZ просочували розплавом солі  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  з наступним відпалом зразків при температурі 400 °С, впродовж 2 год. Процес відновлення сприяє перетворенню  $\text{NiO}$  в металевий  $\text{Ni}$ , що супроводжується зменшенням оксидної фази та зростанням кількості пор у зразку без втрати міцності.

Процедура просочування з наступним відпалом вважається за один цикл просочування. Було вивчено вплив кількості циклів просочування на вміст  $\text{NiO}$  в каркасі, зміну пористості заготовки аноду після кожного просочування, а також вплив вмісту  $\text{NiO}$  на міцність каркасу.,

Дослідження електричного опору відновлених зразків виконувалось чотирьохзондовим методом при постійному струмі за кімнатної температури.

Структуру зразків вивчали за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM).

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 3.1 наведено дані щодо залежності поруватості остовів 3,5YSZ в залежності від вихідного вмісту пороутворювача (крохмалю).

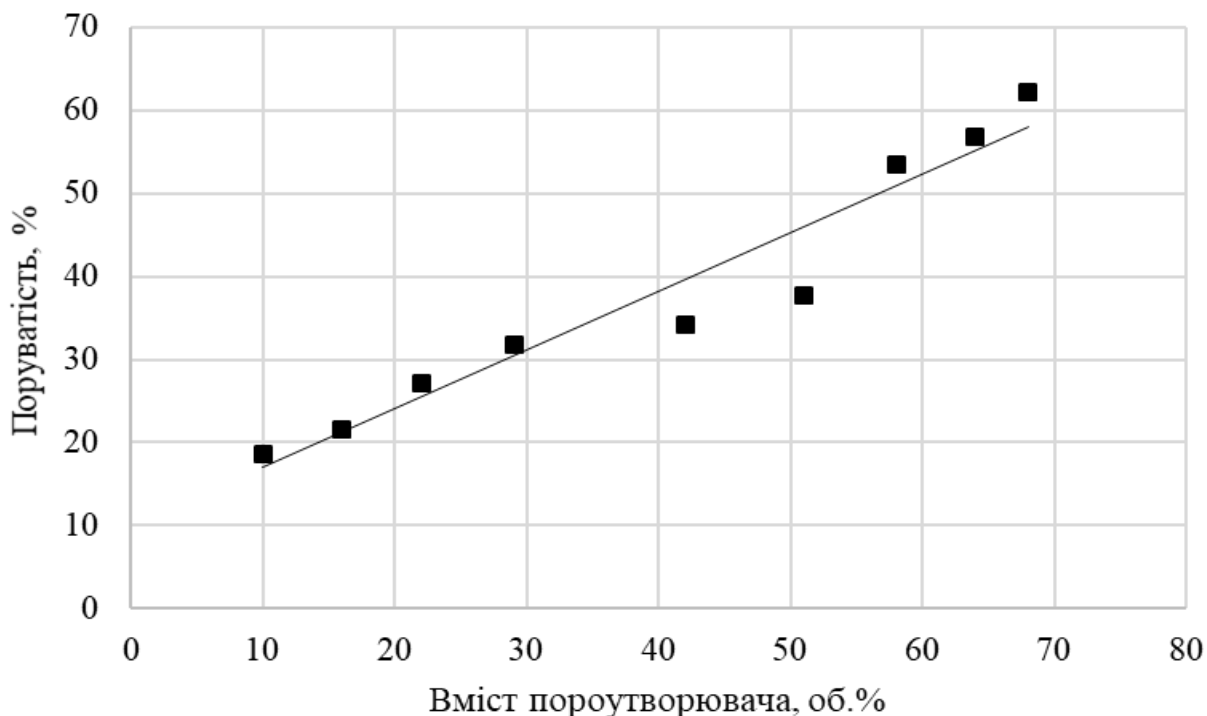


Рисунок 3.1 - Залежність поруватості остовів 3,5YSZ, спечених при 1400 °С, від вмісту пороутворювача.

Внаслідок вигорання у процесі спікання доданого до вихідного порошку 3,5YSZ крохмалю зростає поруватість кераміки. Так, при збільшенні вихідного вмісту крохмалю в межах від 10 до 69-об. % поруватість спечених остовів змінювалась від 19 до 62 %, відповідно. Варто відмітити, що при вмісті крохмалю в інтервалі від 10 до 51-об. % - поруватість остовів збільшується практично лінійно з 19 до 38 %. Проте, подальше збільшення вмісту пороутворювача з 51 до 58-об. % призводить до стрибкоподібного зростання поруватості від 38 % до 54 %. Ймовірно, це може бути пояснено досягненням певного критичного вмісту пороутворювача.

Як зазначалось вище, крім достатнього рівня поруватості, анод-підкладка, який виконує функцію носія всієї комірки, має мати достатній рівень міцності (~ 100

МПа[13]). Зростання поруватості цирконієво-керамічних остовів добре корелює зі зменшенням їхньої міцності (рис. 3.2).

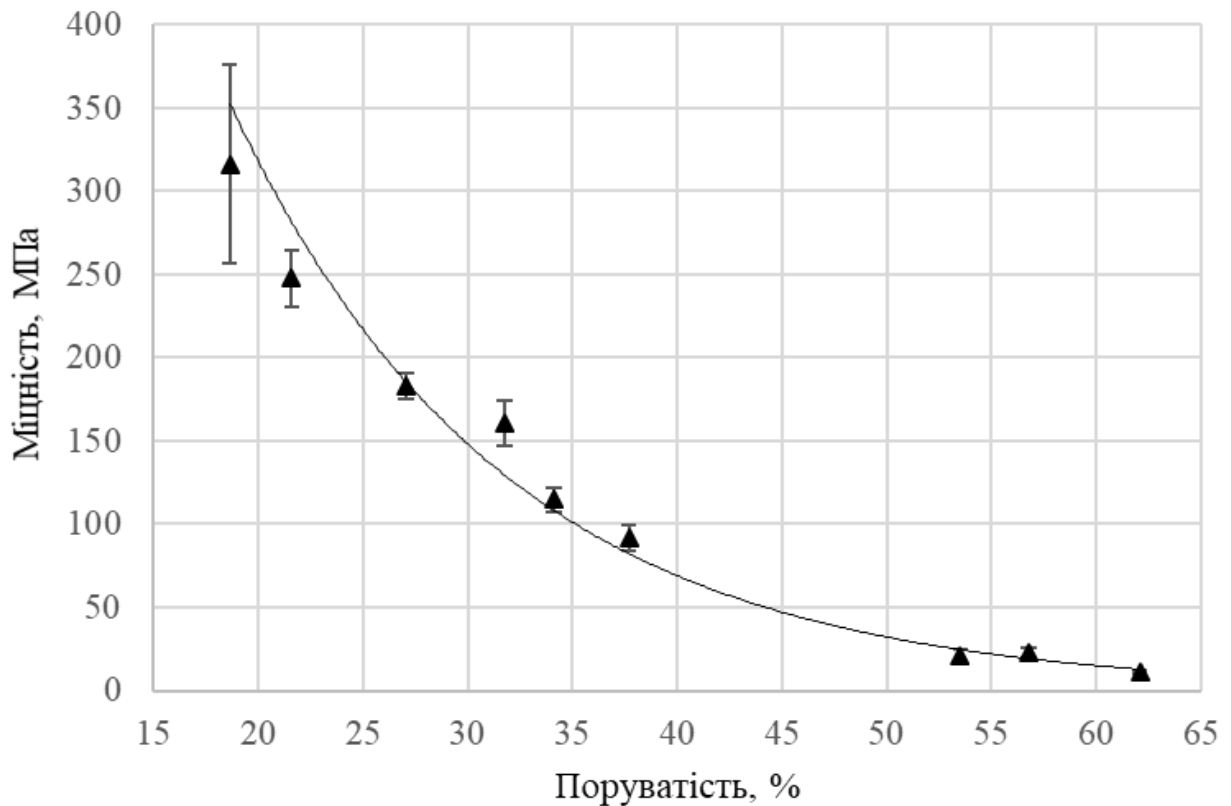


Рис. 3.2 Залежність міцності остовів 3,5YSZ, спечених при 1400 °C, від їх поруватості.

Зміна поруватості від 19 до 62 % призводить до зниження міцності від 316,3 МПа до 11 МПа. Як і у випадку поруватості, при збільшенні вмісту крохмалю з 51 до 58-об. % міцність остовів стрімко падає з 92 до 21 МПа. Оптимальні значення поруватості (38 %) та міцності (92 МПа) забезпечує склад з вмістом крохмалю 51-об. %. Міцність цирконієво-керамічних остовів може бути збільшена після просочення їх нікелем [24]. Злами цирконієво-керамічних остовів зображені на рисунку 3.3

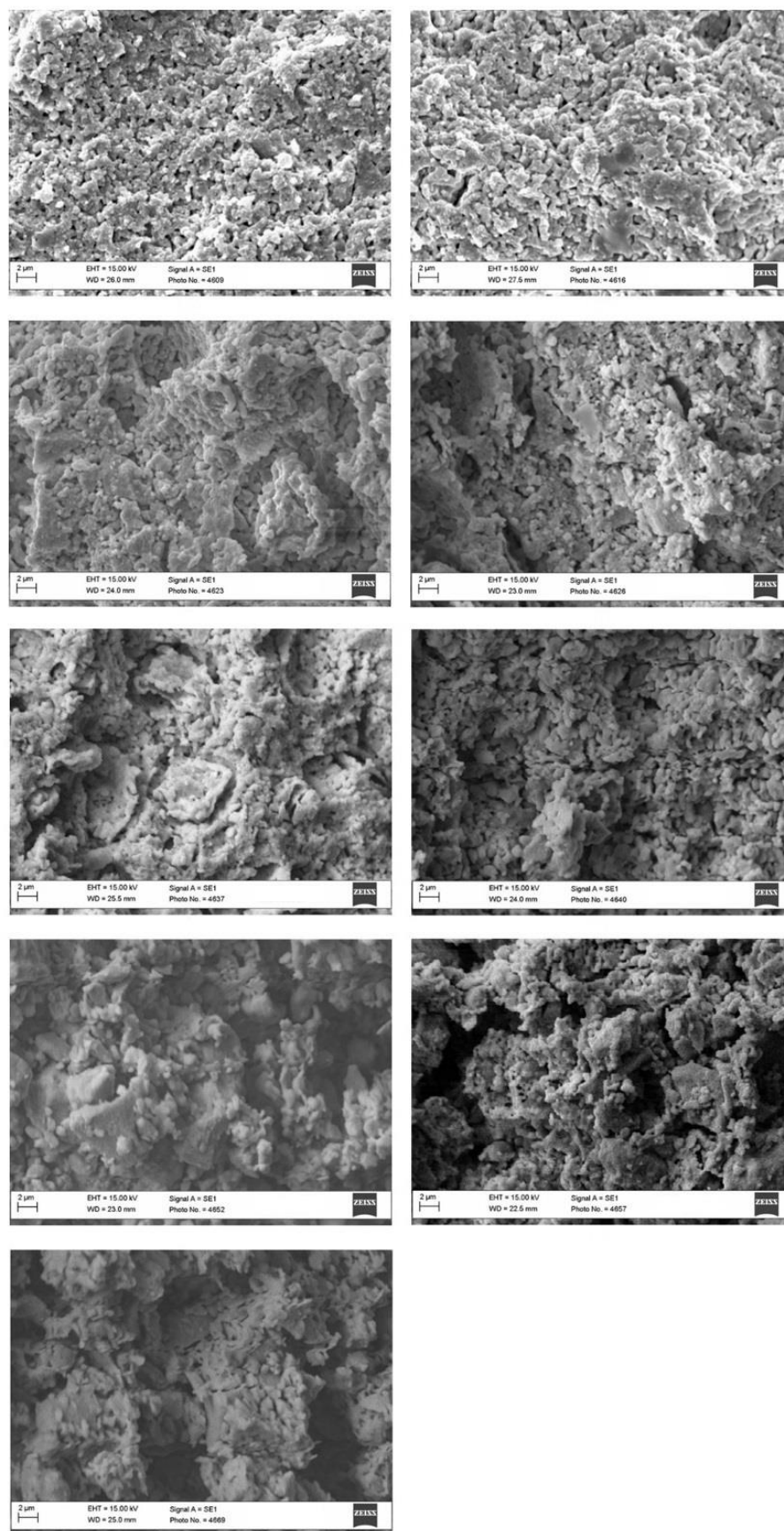


Рисунок 3.3 - СЕМ зображення зламів остовів 3,5YSZ, спечених при 1400 °С з вмістом пороутворювача: 10, 16, 22, 29, 42, 51, 58, 64, 68 -об.% відповідно.

При вмісті пороутворювача 10- та 16-об. % (рис. 3.3) у зламах спостерігаються відносно плоскі ділянки, які свідчать про механізм руйнування відколом тіл зерен. Проте, подальше збільшення кількості пороутворювача і, відповідно, поруватості призводить до зникнення плоских ділянок. У структурі зламів з'являються доволі великі пори розміром 6-7 мкм (рис. 3.3). За формою і розміром таких доволі великих пор співпадають з частинками крохмалю, що дає змогу припустити, що великі пори утворились після вигорання крохмалю. Варто зазначити, що при вмісті пороутворювача 51-об. % (рис. 3.3) у структурі зламу остову також видно рівномірно розподілені дрібні (~0.2 мкм) та великі (~5 мкм) пори. Отже, даний склад задовольняє не лише вимогам щодо значень необхідної поруватості та міцності, але й забезпечує відносно рівномірну структуру. Збільшення кількості пороутворювача до 58-, 64- та 69-об. % супроводжується збільшенням не лише кількості, але й розміру пор (рис. 3.3). Тому стає важко виділити окремі пори. При таких концентраціях пороутворювача не вдається досягти рівномірності розподілу його частинок, що призводить до об'єднання їх у більші агрегати. Вірогідно, внаслідок цього змінюється мікромеханізм руйнування, власне, відбувається перехід від відкольного внутрішньо-зеренного руйнування до міжзеренного, що й може пояснити стрибкоподібний спад міцності для даних складів (58-, 64-, 69-об. % пороутворювача).

Як зазначалось вище, то ідея заміни керамічної складової аноду 8YSZ на 3,5YSZ має забезпечити необхідні значення міцності в матеріалі з підвищеною поруватістю. На рисунку 3.4 представлені залежності міцності 3,5YSZ та 8YSZ [7] керамік, спечених при температурі 1400 °C, від їхньої загальної поруватості.



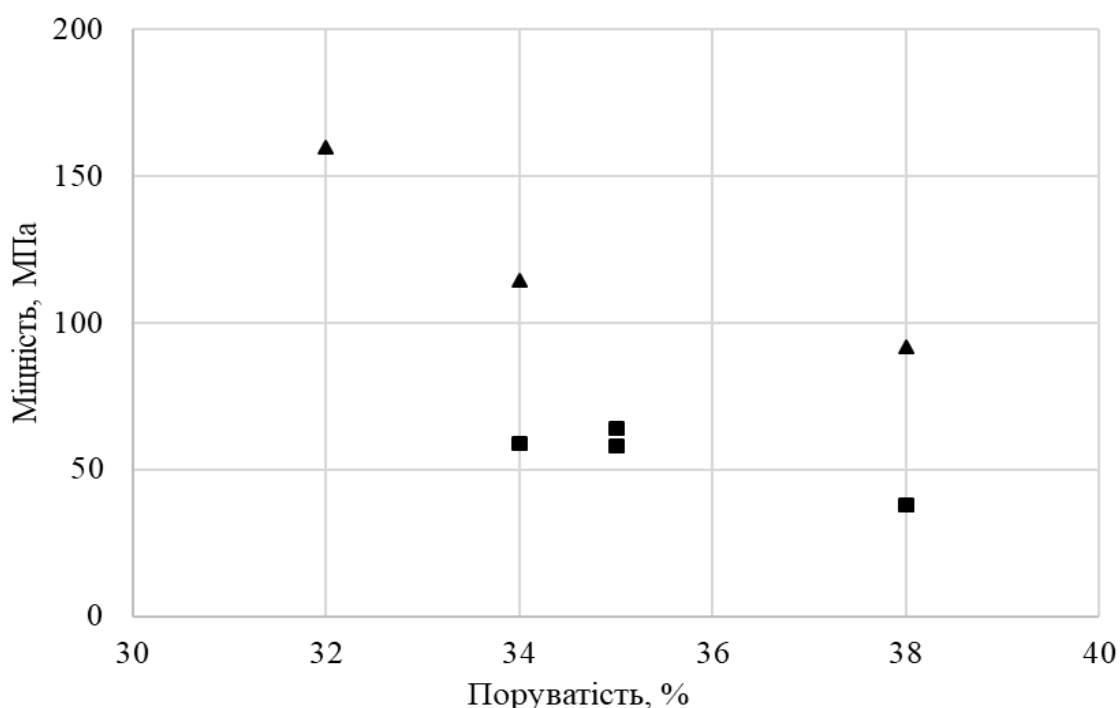


Рисунок 3.4 - Залежність міцності керамічних остовів, спечених при 1400 °C від їх поруватості, з порошків: ▲ – 3,5YSZ; ■ – 8YSZ [24].

Видно, що зі збільшенням поруватості остовів зменшується їхня міцність у обох випадках. У випадку виготовлення остовів з 8YSZ, їхня міцність змінювалась з 65 до 38 МПа при поруватості 34-38 %, відповідно. Міцність остовів з 3,5YSZ становить 114,7 МПа і 92 МПа при поруватості 34 % і 38 %, відповідно. Тобто, при однаковій поруватості (34-38 %) остови з 3,5YSZ мають понад удвічі вищу міцність, ніж остови з традиційної 8YSZ кераміки, що, таким чином, дозволяє рекомендувати порошки 3,5YSZ для виготовлення анодів КПК з необхідною поруватістю.

Для подальшого насичення солями нікелю було обрано остови з вихідним вмістом пороутворювача 51-об.%. Повторна партія зразків була підготовлена за тією ж схемою, що і попередньо та повторно досліджена, для перевірки повторюваності результатів. У таблиці 3.1 наведені дані, щодо нової партії зразків, приготованих до насичення.

Таблиця 3.1 – Значення загальної, відкритої, закритої поруватості та міцності остовів 3,5YSZ

Загальна поруватість, %	Відкрита поруватість, %	Закрита поруватість, %	Міцність, МПа
41,2	39,7	1,5	90

Процес насичення розробленого каркасу з 3,5YSZ нікелем представлено у вигляді залежності вмісту NiO в каркасі від кількості циклів просочування (рис. 3.5). Видно, що при просочуванні каркасу з пористістю ~39 % йде повільне рівномірне збільшення вмісту NiO в ньому. За один цикл просочування вміст NiO збільшується на ~4,5-5-мас. %, що дозволяє досить точно регулювати вміст NiO в анодних керметах.

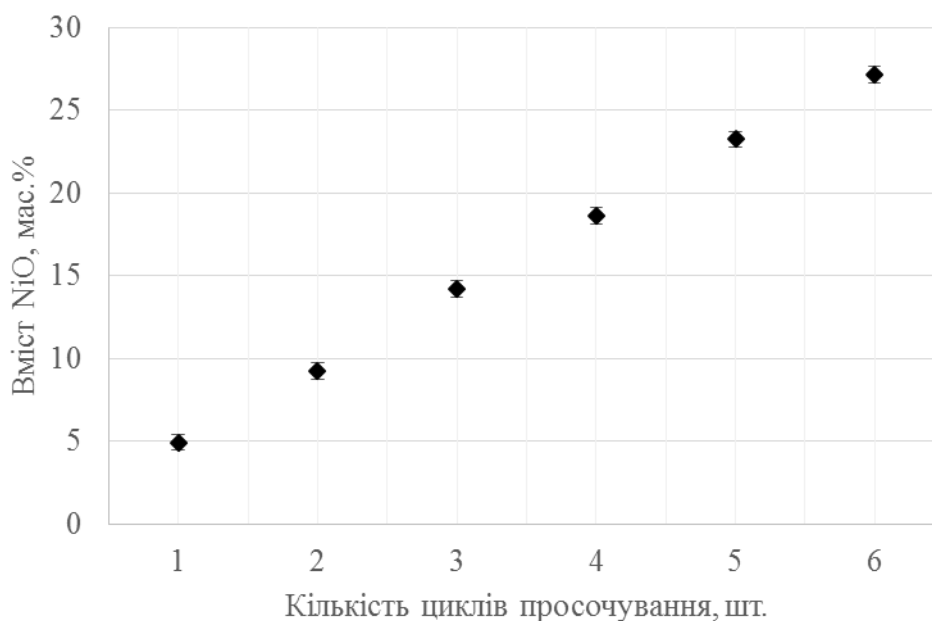


Рисунок 3.5 – Залежність вмісту NiO в остовах 3,5YSZ від кількості циклів просочування. Кількість NiO забезпечується, відповідно, кількістю циклів просочування керамічного каркасу розплавом солі  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Після кожного циклу просочування зразки відновлювали у водні при 500 °C протягом 2 годин та перевіряли наявність електричної провідності в

них. Було встановлено, що лише після 6 циклів просочування зразків з їх послідуочим відновленням з'являється електрична провідність.

Слід зазначити, що в процесі насичення поруватих остовів солями нікелю з їх подальшим відпалом при 400 °С в зразках почали з'являтися тріщини (рис. 3.6). Кожен послідуочий етап відпалу насичених остовів призводив до збільшення кількості цих тріщин, та навіть вигинання деяких зразків.



Рисунок 3.6 – Остови 3,5YSZ після 6 циклів просочування

Режим відпалу солей  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  було обрано на основі досвіду авторів [24]. Причину утворення даних тріщин, імовірно, можна пояснити наявністю великих пор (5-10 мкм) в структурі зразків (рис. 3.3). В порах, утворених вигоранням пороутворювача, може скупчуватись більша кількість солей. Послідуочий відпал солей нікелю викликає внутрішні напруження в зразках, котрі і призводять до розтріскування.

В таблиці 3.2 наведені дані щодо значень поруватості та міцності остовів після 6 циклів просочування солями нікелю, до та після відновлення нікелю.

До відновлення					
NiO, об.%	3,5YSZ, об.%	Загальна поруватість, %	Відкрита поруватість, %	Закрита поруватість, %	Міцність, МПа
15,9	50,6	33,5	30	3,5	27,7
Після відновлення					
Ni, об.%	3,5YSZ, об.%	Загальна поруватість, %	Відкрита поруватість, %	Закрита поруватість, %	Міцність, МПа
9,3	51,5	40	35,7	4,3	15

Невідповідність у значеннях об'ємного вмісту цирконію, а також повернення значень поруватості рівних значенням до насичення остовів (табл. 3.1) також пояснюється появою тріщин в зразках.

Для встановлення причини руйнування зразків необхідно провести подальші дослідження їх структури.

Імовірно, необхідним є пошук альтернативних методів формування додаткової поруватості керамічних остовів: наприклад, через відпалювання вихідного порошку 3,5YSZ.

## **4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Для забезпечення безпеки під час виготовлення аноду КПК необхідно звернути увагу на створення умов які виключають вплив небезпечних і шкідливих факторів на працюючий персонал

Охорона праці є невід'ємною складовою організації виробництва та праці. Вона вимагає створення таких умов трудової діяльності, при яких виключається вплив на працюючий персонал небезпечних і шкідливих виробничих факторів, а також забезпечення безпеки здоров'я та працездатності людини в процесі її трудової діяльності. Основні положення про охорону праці визначені Конституцією України, Законом України «Про охорону праці» та іншими нормативно-технічними та законодавчими актами визначені основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці.

Метою даного розділу є аналіз шкідливих та небезпечних факторів та умов, що можуть виникнути під час технологічного процесу виготовлення аноду КПК. А також розробка інженерних рішень та заходів спрямованих на усунення загроз та ризиків та забезпечення безпеки під час надзвичайних ситуацій.

### **4.1. Аналіз шкідливих та небезпечний факторів**

Технологічний процес вимагає використання наступних приладів: лабораторний барабанний змішувач, гідравлічний прес, вакуумна установка, піч для спікання.

Під час роботи у лабораторії працівники виконують переміщення дрібних предметів або виробів вагою до 1кг, у положенні стоячи або сидячи, що потребує незначного фізичного напруження. Данна робота відповідає категорії середньої важкості Па. У лабораторії виготовлення керамічних паливних комірок значення показників відносної вологості, температури та швидкості руху повітря

відповідають допустимим вимогам встановленим для данної категорії робіт на постійному робочому місці в теплу та холодну пору року. Данні умови мікроклімату забезпечуються штучною припливно-витяжній вентиляції у теплу пору року та встановленому водяному опаленню у холодну пору року.

При виконанні даної роботи було виявлено наступні небезпечні та шкідливі фактори:

- наявність шкідливих речовин та запиленість повітря;
- наявність шумового впливу;
- наявність інфрачервоного випромінювання;
- можливість ураження електричним струмом.
- пожежонебезпека

Попереднє знежирення інструмента передбачає використання бензину, ацетону та спирту.

В повітрі робочої зони будуть присутні шкідливі пари цих речовин, які викликають алергічні захворювання в виробничих умовах.

Гранично допустимі концентрації: бензину 100 мг/м<sup>3</sup>, ацетону 200 мг/м<sup>3</sup>, спирту 1000 мг/м<sup>3</sup>.

Основними причинами ураження електричним струмом є доторкання до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою в робочому режимі. Джерелом можливого ураження електричним струмом є основне технологічне обладнання, з робочою напругою постійного струму 1500В у режимі іонного очищення та 300В в режимі нанесення покриття. Також електрообладнання, яке працює за напруги 380В змінного струму.

#### **4.2. Інженерні рішення для забезпечення безпеки технологічного процесу та запобігання дії шкідливих та небезпечних виробничих факторів**

Основними методами запобігання небезпеки при виконанні даної роботи є:

- Окреме приміщення для приготування розчинів та робіт з токсичними речовинами, яке обладнане загальною обмінною та місцевою витяжною, вентиляцією;
- Місцева витяжна вентиляція на робочих місцях від вакуумної камери та витяжної шафи. Швидкість повітря в робочому перерізі місцевої вентиляції повинна бути не менша 0,6 м/с;
- Очищення видаленого вентиляцією повітря, що забруднене шкідливими речовинами, для цього вентиляція оснащується фільтром для очищення повітря від пилу;
- Світлова та звукова сигналізація, яка сповіщає про припинення роботи вентиляції;
- Індивідуальні засоби захисту (респіратор фільтруючий універсальний РУ-60М).

##### **Аналіз запиленості**

Чистота повітря в лабораторії визначається вмістом пилу і шкідливих речовин. Для робочих місць визначається гранично допустима концентрація в робочій зоні – ГДК<sub>рз</sub> [31, 32].

З матеріалів, які використовуються в твердому стані, шкідливих речовин немає. Проте при технологічному процесі змішування, дозування та пресування порошків можливе утворення дрібнодисперсного пилу із порошків оксиду ітрію та діоксиду цирконію. Пил впливає на організм людини переважно як фіброгенний фактор, що викликає подразнення слизових оболонок дихальних шляхів та осідаючи в легенях практично не потрапляє до кровообігу внаслідок поганої розчинності в біологічних середовищах (кров, лімфа). Найбільшу небезпеку чинить дрібнодисперсний пил.

Концентрація шкідливих речовин, що впливають на організм людини, в лабораторії за умов експерименту не перевищує гранично допустимих

концентрацій, а саме оксид цирконію( $ZrO_2$ ) 6 мг/м<sup>3</sup> та оксиду ітрію( $Y_2O_3$ ) 2 мг/м<sup>3</sup>. Для запобігання попадання пилу у дихальні шляхи при роботі змішування та дозування використовувався респіратор фільтруючий універсальний РУ-60М [31].

### Вентиляція

Під час виконання операцій технічного процесу виготовлення зразків необхідно забезпечити очистку повітря. У лабораторії керамічних паливних комірок вентиляція виконується механічною системою, що здійснює рух повітря за допомогою вентиляторів. Витяжне повітря очищується від пилу, газів та шкідливих домішок за допомогою тканинного фільтра ФБК, перед безпосереднім викидом його в атмосферу. Перевагами механічної вентиляції є те що вона має змогу рівномірно працювати протягом року в необхідному режимі, не залежно від зовнішніх умов, також забезпечує циркуляцію повітря по усьому приміщенню.

### Аналіз рівня шуму

У лабораторії наявні наступні джерела шуму: гідравлічний прес, механічний барабанний змішувач, вакуумний насос.

При постійній роботі обладнання шум не змінюється більше ніж на 5дБ, що за часовою характеристикою є постійним шумом механічного походження.

При одночасній роботі обладнання рівень шуму може перевищувати допустимі норми. Тому при виконанні операцій з обладнанням яке є джерелом шуму, задля зменшення шкідливого впливу використовувались протишумові навушники для звукоізоляції, як індивідуальний засіб шумозахисту.

### Дослідження інфрачервоного випромінювання

Інфрачервоне випромінювання впливає на функціональний стан людини, його центральну нервову систему, серцево-судинну систему, а також може викликати цілий ряд патологічних змін в стані очей. Допустима густина потоку ІЧВ встановлена з урахуванням області випромінювання. Інтенсивність опромінення ІЧВ від відкритих джерел (нагрітий метал та нагрівачі) не повинна перевищувати 140 Вт/м<sup>2</sup> при опроміненні не більш ніж 25 % поверхні тіла і обов'язковому



застосуванні засобів індивідуального захисту, в тому числі засобів захисту обличчя та очей.

Захист здійснюється екрануванням джерел випромінювання за допомогою теплоізолюючих матеріалів. Ззовні піч має металевий кожух. В якості засобів індивідуального захисту з метою зменшення впливу промислової енергії на відкриті ділянки шкіри рук застосовуються рукавиці суконні, для захисту очей від впливу ІЧВ – окуляри зі спеціального жовто-зеленого скла.

При роботі з печами для спікання існує небезпека теплового впливу на організм людини, який викликає інфрачервоне випромінювання. Джерелами теплового випромінювання в лабораторії керамічних паливних комірок є піч для спікання. Контейнери з матеріалом під час технологічного процесу повністю ізольовані теплоізоляційним матеріалом, тому це суттєво не впливає на мікроклімат

Для попередження ураження електричним струмом:

Виробничі приміщення з точки зору ураження електричним струмом належать до категорії особливо шкідливих. Експлуатація зовнішніх електроустановок прирівнюється до умов експлуатації в особливо небезпечних приміщеннях. У лабораторії керамічних паливних комірок використовується струм напругою 220 В для живлення печей для спікання та гідравлічного пресу використовується струм напругою 380 В. Опір ізоляції силових та освітлювальних електропроводів повинен бути не менше 0,5 МОм.

Згідно із діючими правилами використання електрообладнання ППЕ-97 та приміщення лабораторій з точки зору безпеки ураження людини електричним струмом відносяться до приміщення з підвищеною небезпечністю ураження електричним струмом: можливе одночасне доторкання до металевих заземлюючих предметів і корпусів електроустановок, в результаті цього може бути ураження електричним струмом.

Для зменшення напруги дотику при ураженні струмом використовують заземлення. В даній лабораторії заземленню підлягають печі для спікання, гідравлічний прес.

## Пожежна безпека

Виникнення пожеж в лабораторії можливе за таких обставин:

- порушення правил протипожежної безпеки;
- несправність електрообладнання;
- необережне поводження з вогнем;
- ремонт устаткування на ходу;
- конструктивні недоліки обладнання;
- неправильне користування обладнанням.

Для запобігання пожеж необхідно чітко дотримуватись правил протипожежної безпеки.

Класифікація приміщення:

- пожежонебезпечність категорії Г згідно з [33];
- клас зони П згідно [34]: простір за якого вибухонебезпечне середовище за нормальних умов праці відсутнє, а якщо і виникає то ненадовго і рідко.
- клас потенційно можливої пожежі А згідно з [35] (А – тверді речовини, переважно органічного походження, горіння яких супроводжуються тлінням (деревина, текстиль, папір).
- евакуація з поверху де знаходиться робоче приміщення виконується згідно з планом(рисунок 4.1).

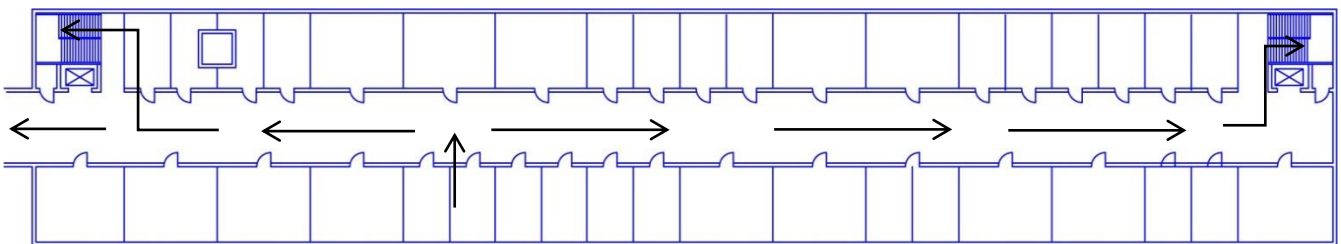


Рисунок 4.1 - План евакуації з приміщення

У випадку виникнення пожежі на електроустановці, яка знаходиться під напругою, полум'я, котре виникає, гаситься не водою, а за допомогою

вуглекислотного вогнегасника. Для попередження персоналу про виникнення пожежі спрацьовують оповіщувачі.

В лабораторії є вуглекислотний вогнегасник ВВ-2, а на сходових клітках і в коридорах ящики з піском, вогнегасники типу ВВ-8, пожежні крани.

У приміщенні лабораторії встановлено 4 пожежні сигналізатори ИП-105, сигнал з яких надходить на основну панель пожежної сигналізації. Сигналізатори ИП-105 спрацьовують на підвищення температури до  $t = 72\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У коридорі знаходиться пожежний кран із приєднаним пожежним рукавом.

Відповідно до [36] будівля відноситься до I ступеня вогнестійкості (будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів).

#### Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробією електричної напруги на корпус електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника дільниці.

У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, необхідно відключити електродуговий агрегат від мережі, покласти потерпілого на дерев'яний настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити постраждалому штучне дихання.

У випадку загорання електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний:

- негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за номером телефону 101;
- приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на дільниці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо);
- викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, дільниці).

У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра,

начальника ділянки та звернутися в медпункт.

## 5. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Метою енергетичного розділу проекту є розрахунок кількості електроенергії, необхідної для забезпечення нормальної роботи цеху, а також витрат палива, газів та інших джерел енергії.

Обсяг витрат електроенергії на технологічне обладнання визначають на підставі вибору і розрахунку кількості обладнання та його потужності в режимі роботи:

$$E = M\Phi_0\eta_{зв}K_1K_2,$$

де  $M$  – встановлена потужність обладнання, кВт;

$\Phi_0$  – річний фонд часу роботи обладнання, год;

$\eta_{зв}$  – коефіцієнт завантаження обладнання;

$K_1$  – коефіцієнт одночасності роботи (беруть рівним: для електричних печей 0,6, для двигунів 0,3);

$K_2$  – коефіцієнт використання потужності рівний 0,7.

Витрати енергії підйомно-транспортувального обладнання визначають, виходячи з його потужності.

В умовах малотоннажних виробництв транспортувальне обладнання вибирають разом з основним, його характеристики вносять у відомість основного обладнання.

Витрати енергії для санітарно-технічних пристроїв (вентиляції, опалення) визначають згідно з вимогами до охорони праці та техніки безпеки.

Барабанний млин для змішування:

$$E = 2,5 \cdot 260 \cdot 8 \cdot 0,65 \cdot 0,3 \cdot 0,7 = 709,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Сушильна піч:

$$E = 1 \cdot 85 \cdot 8 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,7 = 199,92 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Піч Linn High Term VMK-1600:

$$E = 3,5 \cdot 280 \cdot 6 \cdot 0,875 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 2881,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Результати розрахунків витрат електроенергії зводимо у таблицю 5.1, де  $K_c$  - кількість споживачів;  $N$  – потужність,  $kBm$ ;  $k_{одн}$  – Коефіцієнт одночасності роботи;  $T_{рчр}$  – Фонд робочого часу на рік, год;  $k_{зав}$  – Коефіцієнт завантаження

Таблиця 5.1- Річні витрати електроенергії

Найменування струмоприймача	$K_c$	$N$	$k_{одн}$	$T_{рчр}$	$k_{зав}$	Річні витрати електроенергії, кВт·год
Планетарний млин для змішування	1	2,5	0,3	260	0,65	709,8
Піч сушильна	1	1,6	0,6	85	0,6	199,92
Піч Linn High Term VMK-1600	1	3,5	0,6	280	0,875	2881,2
Всього						3790,92

Розрахунок витрат енергії на освітлення для кожного приміщення виконують на підставі плану цеху. Вихідні дані для розрахунку - площа приміщення, потрібна освітленість і режим роботи освітлювальних точок.

Витрати енергії на освітлення розраховують за формулою:

$$Q = Sq \tau f / 1000,$$

де  $S$  – освітлювана площа,  $m^2$ ;

$q$  – поверхнева щільність теплового потоку,  $Вт/m^2$ ;

$\tau$  – кількість годин горіння на рік;

$f$  – коефіцієнт одночасного горіння

Площа лабораторії – 36  $m^2$ . Значення  $q$  зазвичай беруть: для виробничих приміщень – 11 - 15  $Вт/m^2$ . Для двозмінної роботи значення  $\tau$  беруть рівним: - 2500

год, Коефіцієнт, який враховує одночасність горіння ламп, для виробничих ділянок беруть 0,8.

Розрахунок витрат електроенергії на освітлення лабораторії КПК.

$$Q = 36 \cdot 15 \cdot 2500 \cdot 0,8 / 1000 = 1080 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

## 6. ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

### 6.1. Науково-технічна актуальність НДР

Керамічна паливна комірка (КПК), має досить широкий діапазон перспективних застосувань: від портативних джерел струму (10-500 Вт) до автономних стаціонарних електростанцій (1-10 МВт). Їх привабливість обумовлена, насамперед, високою ефективністю прямого перетворення хімічної енергії палива в електричну. ККД таких енергоустановок на КПК в два рази вищий, ніж у теплових електростанціях.

При цьому, в якості палива може застосовуватись будь-які вуглеводні (аж до технічних і біологічних відходів життєдіяльності людини), а окиснювачем служить повітря. Причому електрохімічне горіння палива забезпечує високу екологічність процесу отримання електроенергії. Кінцевими продуктами реакцій є вода і вуглекислий газ, який конструктивно може збиратися, не посилюючи парниковий ефект в атмосфері землі.

Всі країни, які реально проводять енергозберігаючу політику в енергетиці, мають власні державні або міждержавні програми (наприклад, Євросоюз) з розробки КПК. Їх мета – розвиток екологічно чистої енергозберігаючої розподіленої енергетики на сучасних енергоносіях, де в якості палива можуть використовуватися природний газ, нафта, продукти їх переробки, а також використання водневої енергетики.

Вперше КПК був використаний при 1000 °С Бауером і Прейс в 1937 р. З тих пір наукові дослідження КПК головним чином були акцентовані на дослідженні складу електроліту, розвитку сумісних анодів, катодів і проміжного з'єднувального матеріалу, мінімізації опору кола, скорочення робочої температури і розвитку високоефективних методів отримання тонких плівок. В даний час, багато компаній активно займаються цими завданнями.

Твердий стан основних компонентів КПК вносить різноманітність в конструкції одиничних елементів і стеків, призводить до використання великої кількості технологій виготовлення. В даний час йде відбір найбільш дешевих



технологій для виготовлення комерційно привабливих енергосистем для енергетики, що забезпечують високу якість КПК і термін служби не менше 500 р.

До складу одного з найпоширеніших типів анодів для КПК входить оксидна кераміка YSZ. В даній роботі проводилося дослідження цирконієво-керамічного каркасу для аноду керамічної паливної комірки складу 3,5YSZ: двооксид цирконію ( $ZrO_2$ ), стабілізований 3,5 % (мол.) оксиду ітрію ( $Y_2O_3$ ).

## **6.2. Мета і завдання НДР**

Метою роботи є розроблення керамічної паливної комірки та заміна традиційного методу виготовлення на каркасний.

Завданням даної роботи було:

- Виготовлення високопоруватих остовів з порошку 3.5YSZ з необхідним рівнем міцності.
- Обрати остови з оптимальними параметрами для подальшого просочування нікелем
- Дослідження впливу кількості нікелю на поруватість, міцність, провідність та структуру насичених керамічних остовів.

## **6.3. Розрахунок чисельності виробників та розрахунок заробітної плати**

Витрати на заробітну плату співробітникам розраховуються на основі визначення трудомісткості робіт виконавців та їх денної заробітної плати (враховуючи кількість виконавців, їхню кваліфікацію і завантаженість роботою на різних етапах НДР).

Під час виконання НДР застосовувалась участь чотирьох виконавців: старший науковий співробітник, молодший науковий співробітник, інженер-дослідник і технік. Тарифні ставки сумарної місячної заробітної плати складають:

- старшого наукового співробітника – 8500 грн.;
- молодший науковий співробітник – 6500 грн.;
- інженера-дослідника – 5000 грн.;
- техніка – 4500 грн.

Денна заробітна плата кожного з виконавців визначається як місячна заробітна плата, поділена на середню кількість днів у місяці, що при п'ятиденному робочому тижні становить 21,2. Таким чином, величина денної заробітної плати виконавців складає:

- старшого наукового співробітника – 400,95 грн.;
- молодшого наукового співробітника – 306,60 грн.;
- інженера-дослідника – 235,85 грн.;
- техніка – 212,26 грн.

У випадку відсутності відповідних розрахункових методик трудомісткості різних етапів виконання НДР встановлюється на базі експертних оцінок, які дають провідні фахівці. При цьому НДР розглядається як сукупність макроетапів, аналіз кожної окремої операції не проводиться. Результати експертної оцінки трудомісткості етапів НДР наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Трудомісткість макроетапів виконання НДР

Макроетапи НДР	Трудомісткість за виконавцями, людино-днів			
	Старший науковий співробітник	Молодший науковий співробітник	Інженер-дослідник	Технік
1. Аналіз фахових публікацій за теми	5	5	8	—
2. Обґрунтування мети та напрямків	3	3	3	—
3. Розроблення методики проведення досліджень за темою	4	4	4	—
4. Проведення експерименту: - виготовлення зразків	—	20	60	60
5. Обговорення результатів НДР	5	5	5	—
6. Оформлення результатів НДР	—	4	4	—
Всього	17	41	84	60

Величина заробітної плати виконавців ( $Z_{\text{зп}}$ ) обчислюється як сума добутків трудомісткості і денної заробітної плати кожного з них:

$$Z_{\text{зп}} = 17 \cdot 400,95 + 41 \cdot 306,60 + 84 \cdot 235,85 + 60 \cdot 212,26 = 51933,75 \text{ грн.}$$

## **7. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА**

### **7.1. Розрахунок собівартості проведення дослідження**

Робота виконувалася в лабораторії керамічних паливних комірок ІПМ ім. Францевича НАН України. Планова кошторисна вартість (собівартість) науково-дослідницької роботи розраховувалась за наступними статтями витрат:

- заробітна плата науково-виробничого персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- вартість матеріалів, необхідних для виконання НДР;
- вартість спеціального обладнання для проведення експерименту;
- інші прямі невраховані витрати;
- накладні витрати.

### **7.2. Визначення єдиного соціального внеску**

Згідно з діючим законодавством єдиний соціальний внесок складає 22% від заробітної платні.

$$B_C = 0,22 \cdot 51933,75 = 11425,425 \text{ грн.}$$

### **7.3. Визначення вартості матеріалів для виконання НДР**

Для проведення досліджень використовувались наступні матеріали: цирконієвий порошок 3,5YSZ, крохмаль та етиловий спирт. Дані про вартість перелічених матеріалів наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 - Вартість основних матеріалів

Найменування	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
Порошок 3,5YSZ	кг.	0,5	600	300
Крохмаль «Тапіока»	кг.	0,1	18	1,8
Етиловий спирт	л.	1	80	80
Всього				381,8

Транспортні витрати приймаємо у розмірі 10% від вартості матеріалів:

$$C_M = 381,8 \cdot 1,1 = 419,98 \text{ грн.}$$

Визначення вартості спеціального обладнання і приладів

При виконанні науково дослідницької роботи усі досліди проводилися з використанням лише наявного обладнання в лабораторії керамічних паливних комірок ІПМ ім. Францевича НАН України.

Визначення вартості робіт і послуг сторонніх організацій

При виконанні даної роботи сторонні організації не приймали участі.

#### 7.4. Визначення інших прямих витрат

Інші прямі невраховані витрати плануються у розмірі 10% від врахованих;

$$C_{\text{інш}} \approx 0,1 \cdot (51933,75 + 11425,425 + 419,98) = 6377,915 \text{ грн.}$$

#### 7.5. Визначення накладних витрат

Накладними витратами вважаються витрати на заробітну плату адміністративно-управлінського, господарчого та допоміжного персоналу (з урахуванням єдиного соціального внеску), фінансування підготовки кадрів, витрати

на допоміжні виробництва, охорону праці, техніку безпеки та екологію., і деякі інші.

Норматив відрахувань на накладні витрати для лабораторії керамічних паливних комірок ІПМ ім. Францевича НАН України встановлений в розмірі 16% планової суми прямих витрат на виконання НДР. Розраховуємо величину накладних витрат наступним чином:

$$H_B = 0,16 \cdot (51933,75 + 11425,425 + 419,98 + 6377,915) = 11225,13 \text{ грн.}$$

#### **7.6. Визначення планової кошторисної вартості НДР**

Планова кошторисна вартість НДР визначається як сума видатків за окремими статтями витрат. Результати визначення вартості наведені у таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 - Розрахунок планової кошторисної вартості НДР за темою

Найменування статей	Позначення	Сума	
		грн.	%
1. Фонд заробітної плати виконавців теми	З <sub>зп</sub>	51933,75	63,08
2. Відрахування на соціальне страхування	В <sub>с</sub>	11425,425	14,03
3. Матеріали, придбані вироби, напівфабрикати	С <sub>м</sub>	419,98	0,51
4. Спеціальне обладнання для наукових робіт	С <sub>об</sub>	—	—
5. Робота і послуги сторонніх організацій	С <sub>стор</sub>	—	—
7. Інші прямі невраховані витрати	С <sub>інш</sub>	6377,915	7,83
8. Накладні витрати	Н <sub>в</sub>	11225,13	13,79
Всього	В <sub>ндр</sub>	81382,2	100

Згідно з таблицею 7.3 загальна планова кошторисна вартість НДР складає:

$$В_{\text{ндр}} = 81382,2 \text{ грн.}$$

### 7.7. Визначення та розрахунок показників економічної ефективності

Дослідження, що проводяться в даній роботі, мають пошуковий та теоретичний характер. Відповідно з цим прямий розрахунок очікуваного річного економічного ефекту надзвичайно складний, оскільки відсутні повні дані відносно сфери використання результатів роботи, а також вихідні дані для розрахунку одночасних та поточних витрат. У такому випадку слід використовувати бальну систему оцінки економічної ефективності за наступними показниками :

- важливість розробки;

- можливість використання результатів;
- теоретичне значення та рівень новизни дослідження;
- складність отриманої розробки.

Частку сумарного річного економічного ефекту, що утвориться за кожною з перелічених шкал, позначають умовно відповідним номеру шкали коефіцієнтом ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ). Наведемо докладніше систему оцінки за кожною шкалою. Першою розглянемо шкалу важливості розробки.

Коефіцієнт  $K_1$  може приймати наступні значення:

- ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт  $K_2$  може приймати такі значення:

- результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями – 5 балів;
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в межах однієї галузі – 8 балів;
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт  $K_3$  може приймати такі значення:

- робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;



- під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;
- внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;
- внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики або що-небудь подібне – 6 балів;
- отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт  $K_4$  може приймати такі значення:

- роботу виконує один підрозділ, витрати до 1000 гривень – 1 бал;
- роботу виконує один підрозділ, витрати від 1000 до 5000 гривень – 3 бали;
- роботу виконує один підрозділ, витрати від 5000 до 10000 гривень – 5 балів;
- робота виконується багатьма підрозділами, витрати від 10000 до 50000 гривень – 7 балів;
- робота виконується багатьма організаціями, витрати більше 50000 гривень – 9 балів.

Бальна оцінка економічної ефективності даної науково-дослідницької роботи наведена у таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 - Бальна оцінка ефективності НДР

Показники оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристика даної розробки	Кількість балів
1. Важливість розробки	$K_1$	Робота ініціативна, не є завданням будь-яких директивних органів або частиною комплексної програми	1
2. Можливість використання результатів розробки	$K_2$	Результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях	10
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	$K_3$	Внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики або що-небудь подібне	6
4. Складність дослідження	$K_4$	Робота виконується одним підрозділом, витрати від 1000 до 5000 гривень.	3

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно таблиці 7.4 становить:

$$B = 1 \cdot 10 \cdot 6 \cdot 3 = 180.$$

Умовний річний економічний ефект науково-дослідницької роботи ( $E_{\text{НДР}}$ ) визначається:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot B - E_{\text{Н}} \cdot V_{\text{НДР}}, \quad (7.1)$$

де 500 – умовна вартість одного балу, грн.;

$E_{\text{Н}}$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ( $E_{\text{Н}} = 0,15 \div 0,5$ , для нашого розрахунку обираємо  $E_{\text{Н}} = 0,3$ );

$V_{\text{НДР}}$  – витрати на виконання НДР (планова річна кошторисна вартість виконання НДР, для нашого розрахунку  $V_{\text{НДР}} = 50798,87$  грн.).

Таким чином, умовний економічний ефект за формулою (7.1) становить:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 180 - 0,3 \cdot 50798,87 = 74760,34 \text{ грн.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$E_{\text{НДР}} = E_{\text{НДР}} / V_{\text{НДР}}, \quad (7.2)$$

$$E_{\text{НДР}} = 74760,34 / 50798,87 = 1,47.$$

Отримана розрахункова величина коефіцієнта економічної ефективності НДР ( $E_{\text{НДР}} = 1,47$ ) свідчить про доцільність виконання даної роботи.

## 8. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Як відомо, на сьогоднішній день все більше набувають популярності «стартап-проекти». Тому в даній роботі розглядається можливість розроблення проекту за темою дисертації.

Інновація - це новостворені (застосовані) і (або) вдосконалені конкурентоздатні технології, продукція або послуги, а також організаційно-технічні рішення виробничого, адміністративного, комерційного або іншого характеру, що істотно поліпшують структуру та якість виробництва і (або) соціальної сфери

Інновації - це реальні процеси створення нових знань, систем та засобів виробництва, технологій і впровадження їх у сферу економіки чи державного управління, товарообміну або міжнаціональних зв'язків. Якщо поширення інновації набуває загальносуспільного характеру, то інновація стає національним комплексно-інноваційним процесом. Інновація стає процесом тоді, коли вона базується на безперервному розвитку науково-технічного прогресу та його втіленні в нові види засобів виробництва, технологій, продуктів, форм і методів виробництва й управління. Інновація як процес завершується лише тоді, коли споживач оцінить стосовно своїх потреб ідею і знання щодо їх реалізації, технічний засіб виробництва та реальне використання його під час виробництва продукту, реалізацію товару й отримання прибутку, купівлю товару і задоволення виробничих та соціальних потреб.

Для початку слід розглянути питання, що таке стартап-проект - нещодавно створена компанія (можливо, ще не зареєстрована офіційно, але планує стати офіційно), що будує свій бізнес на основі інноваційних технологій, не вийшла на ринок чи почала виходити і що володіє обмеженими ресурсом. Таким чином компанія є обмеженою ресурсно, тому вона сильно залежить від інвесторів. Тому в першому випадку доцільно розглянути саму ідею стартап-проекту яка представлена в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Заміна паливної комірки з стабілізованого діоксиду цирконію замість 8YSZ на 3,5YSZ,	Промислова електрохімія	Матеріали для емісійної електроніки
	Транспорт	Акумулятори
	Паливна	Перетворення хімічної енергії в електричну

Однак, на сьогоднішній день ринок України та не тільки займають не тільки вітчизняні, а і міжнародні фірми, які продовжують тримати лідерство, тому доцільним є розглянути позитивні та негативні сторони нашого проекту та конкурентів (табл. 8.2).

Основним чинником виконання даного проекту, чи роботи, є можливість застосування надійної та простої технології виготовлення. Дана технологія повинна мати гарну відтворюваність результатів, та мати економічний ефект при використанні, аналіз технології наведений в таблиці 8.3.

Таблиця 8.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товар				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Bloom Energy, Delphi,	Praxair (США)	Цирконія України, ТОВ (Україна)			
1	Пористість	Паливної комірка з стабілізованого діоксиду цирконію замість 8YSZ на 3,5YSZ,				-	-	+
2	Інформаційне забезпечення					-	-	+
4	Контроль якості					-	+	-
3	Ціна					-	+	-

Таблиця 8.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технології	Доступність технологій
Паливної комірка з стабілізовано-го діоксиду цирконію 3,5YSZ,	Статичне пресування та спікання матеріалу	Наявна технологія, можливість прогнозування отриманих результатів, висока точність розмірів, відсутність браку	Доступна технологія
	Вільна засипка порошку в форму	Наявна технологія, перевагою є висока пористість, недоліком є мала продуктивність, сферична форма вихідного порошку	Доступна технологія

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: спікання

Як було показано вище, найбільш оптимальним методом отримання матеріалу є статичне пресування та спікання, який дає найбільший ефект, так як дозволяє отримувати необхідну пористість. Тому для входження на ринок товарів та послуг слід розглянути останні.

Технологічність - відповідність продукції вимогам економічної технології її

використання. Технологічність забезпечується при розробці конструкції виробу. Технологічною називається така конструкція виробу або його складових елементів (деталей, вузлів, механізмів), яка забезпечує задані експлуатаційні якості продукції і дозволяє при даній серійності виготовляти її з найменшими затратами праці та матеріалів. Технологічна конструкція характеризується простотою компоновки, довершеністю форм. Попередня характеристика потенційного ринку наведена у таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показник стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	12000
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Спеціальне обладнання
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Присутні
6	Середня рентабельність в галузі, %	Більше 25 %

Також при входженні на ринок слід враховувати цільову аудиторію на яку буде направлений збут товарів та послуг, враховуючи потреби та вимоги споживачів, так як вони формують ринок (табл. 8.5).

Однак, як з перевагами отримання прибутку можуть виникнути загрози зриву проекту, які слід детально розглянути таблиця 8.6. Як видно із даної таблиці, найбільшу небезпеку на сьогодні становить перебіг в постачанні продукції, який в першу чергу пов'язаний через дефіцит продукції. Однак якщо вирішити дане питання, то вірогідність на успіх є великою через те що даний ринок товарів та послуг не є переповненим.

Таблиця 8.5. - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінність у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Високі значення пористості з рівномірним її розподілом та міцність	Промислова електрохімія, паливна промисловість, транспорт	До даних деталей застосовують спеціальні випробування, та стандарти, які визначають самі покупці	Вимоги до продукції: - низька вартість -висока стабільність - відповідність вказаним габаритам Вимоги до компанії - стабільність товару та поставок - можливість корегування замовлення

Таблиця 8.6 - Фактори загроз

№	Фактори	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Виготовлення сировини	Недостатня кількість сировини через складність отримання та постачання	Можливість закупівлі у інших компаній чи початок налагодження виробництва сировини
2	Складність доставки	Несвоєчасна доставка готової продукції покупцям	Розробка та налагодження логістичних зв'язків
3	Великі витрати	Великі витрати на розхідні матеріали та енергію	Зменшення витрат за рахунок початку виробництва сировини самостійно, оптимізація існуючого обладнання



4	Нестабільність курсу	Нестабільність курсу, що призведе до різкого збільшення вартості сировини і готової продукції	Завчасні домовленості із постачальником про ціну на товар у договорі, зменшення отриманого чистого прибутку за рахунок незначного збільшення ціни на готовий продукт
---	----------------------	---	--

Також на сьогоднішній день варто враховувати і альтернативні ринки, які в тій чи іншій мірі можуть бути зацікавлені в нашій продукції через її високу надійність в порівнянні із аналогами (табл. 8.7). Однак слід врахувати, що даний ринок не є основним і на нього не потрібно робити великі ставки, так як це зачасту одиничні замовлення.

Таблиця 8.7 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернативні ринки збуту	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Транспорт	Одиничні замовлення	В залежності від складності та кількості необхідного товару
2	Промислова електрохімія		
3	Машинобудування		
4	Паливна промисловість		

Надалі логічним є ступеневий аналіз конкуренції на ринку, так як даний аспект дасть можливість точно сказати в який період часу варто впроваджувати продукцію і з якої кількості товару чи послуги доцільно розпочинати (табл. 8.8).

Таблиця 8.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції - олігополія	Наявна велика кількість фірм, що пропонують товар, відмінність у ціні невелика, як і характеристики	Зменшення ціни на продукцію та покращення якості

2. За рівнем конкурентної боротьби - національна	Наявна велика кількість міжнародних фірм	Завоювати довіру на українському ринку та вийти на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою –міжгалузева	Найбільш привабливою є промислова електрохімія та паливна галузь	Реалізовувати продукцію в даних галузях
4. За характером конкурентних переваг - не цінова	Великі обсяги закупівель у вказаних галузях, що є привабливими для збуту	Слід за меншу ціну збільшити показники ефективності деталей
5. За інтенсивністю	Низька інтенсивність, яка проявляється за кількістю проданої продукції	Можливості для невеликої партії

Аналізуючи таблицю можна побачити, що на ринку відсутні монополісти, проте можливе покращення якості виробів, що дасть можливість для нових фірм та дослідно-промислового виробництва.

Аналіз конкурентів - це щорічні зведення (довідники) техніко-економічних показників підприємств тих галузей (підгалузей), до яких входять конкуренти; статистичні довідники; газети, журнали (галузеві).

Аналізуючи всі наведені фактори доцільно скласти SWOT аналіз, який представлений в таблиці 8.9.

Таблиця 8.9 - SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
Високі характеристики кінцевого виробу Відпрацювання технології виробництва та обробки виробу Можливість корегування характеристик Підкріплення практичних даних теоретичними розрахунками для моделювання процесів, які відбуваються під час експлуатації деталі та подальша оптимізація останнього	Недостатня кількість спеціалістів в даній галузі (покупці) може призвести до непорозуміння при постановці задачі Неможливість відтворення реальних процесів, для перевірки матеріалу в відповідних умовах Дороговизна проведення деяких видів аналізу матеріалів
Можливості	Загрози

<p>Набутий досвід призведе до правильного напрямку втілення та досягнення високих результатів</p> <p>Подальші вивчення продукції та покращення характеристик</p> <p>Можливість виходу на інші ринки збуту при невеликій кількості замовлень</p> <p>Залучення та навчання молодих кадрів та використання сучасного обладнання</p>	<p>Можливість несвоєчасного постачання сировини</p> <p>Складність отримання вихідного порошку для подальшого виробництва</p> <p>Великі витрати на розхідні матеріали та на енергію</p> <p>Нестабільність курсу, що призведе до різкого збільшення вартості сировини, і готової продукції</p>
--	--

SWOT - аналіз для визначення факторів і явищ, що роблять найбільший вплив на підприємство. Цей етап включає також визначення стадії життєвого циклу продукції, що дозволяє оцінити необхідність вкладень в розробку вдосконалених видів продукції з тим, щоб уникнути погіршення ринкової позиції в майбутньому.

- Strengths (сильні сторони - досвід та вміння, що дають змогу організації задумати та забезпечити виконання її стратегії.);

- Weaknesses (слабкі сторони - досвід і вміння, що не сприяють вибору та втіленню стратегії, потрібної для виконання місії організації. Організація має два шляхи вирішення проблеми «слабких сторін». По-перше, вона може робити інвестиції, щоб отримати перевагу, необхідну для виконання місії. По-друге, можна змінити місію так, щоб її досягти за допомогою досвіду й умінь, які організація вже має);

- Opportunities (можливості - це умови середовища, що забезпечують досягнення високого результату);

- Threats (загрози - це умови середовища, що ускладнюють досягнення високих результатів навиків і вмінь).

Для визначення існуючої позиції бізнесу та його частин, а також розробки можливих напрямків розвитку можуть використовуватися моделі портфельного аналізу.

Для завершення, слід вказати які основні переваги нашого потенційного товару в порівнянні із аналогами, що дасть можливість стверджувати, про

можливість конкурентно спроможності (табл. 8.10).

Таким чином, можна побачити що високопористі матеріали з порошків нікелю на сьогоднішній день є перспективними матеріалами для виготовлення випаровувачів в теплообмінниках космічних апаратів, виробництво яких може бути реалізоване приблизно за рік з відпрацюванням технології з відповідною сировинною базою.

Таблиця 8.10 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Пористість	Задовільння потреб при невисокій ціні	Велика пористість в порівнянні з аналогами
2	Міцність		Велика міцність
3	Надійність		Надійна робота при циклічних навантаженнях
4	Дешевизна		Дешевизна товару на 25% від конкурентів

## Висновки

За проведеним економічним та маркетинговим аналізом можливості реалізації даного технологічного рішення, а саме: заміну порошку 8YSZ на 3,5YSZ для

виготовлення остового каркасу аноду КПК задля покращення його якості та властивостей. Дане рішення є доцільним з економічної точки зору, та вигідним для реалізації його на ринку за рахунок слабкої конкуренції

## ВИСНОВКИ

За результатами роботи було:

1. Досліджено вплив поруватості керамічних остовів 3,5YSZ на їхню міцність. Встановлено, що збільшення в остовах вихідного вмісту крохмалю з 10- до 64-об. %, супроводжується зростанням поруватості від 19 до 62 %, відповідно. Додавання 58-об. % крохмалю та подальше збільшення його вмісту викликає стрибкоподібне зростання як поруватості остовів, так і зменшення їхньої міцності.

2. Встановлено, що міцність керамічних остовів зменшується з 316,3 МПа до 11 МПа, при збільшенні поруватості від 19 до 62%, відповідно. При вихідному вмісті крохмалю 51-об.% керамічні остови мають оптимальне співвідношення міцності та поруватості, значення яких складають 92 МПа та 38%, відповідно. Критично низькі значення міцності (21, 22,8 та 11 МПа) для остовів з вихідним вмістом крохмалю 58-, 64- та 69-% відповідно, можна пояснити утворенням крупних пор розміром  $\sim 10$  мкм, які в свою чергу стають додатковими концентраторами напружень при руйнуванні.

3. Встановлено, що використання 3,5YSZ замість 8YSZ для виготовлення остову аноду керамічної паливної комірки є доцільним, оскільки дозволяє отримати вищі значення міцності при однаковій поруватості 35-40 %, достатній для роботи паливної комірки.

4. Опрацьовано методику введення нікелю в поруваті остови. Досліджено вплив кількості циклів просочування остовів солями нікелю на вміст нікелю. Досліджено вплив кількості нікелю на міцність та провідність насичених остовів.

## CONCLUSIONS

The results of the work were:

1. The effect of porosity of 3,5YSZ ceramic skeletons on their strength is investigated. It was found that the increase in the backbone content of starch from 10 to 64. %, accompanied by an increase in porosity from 19 to 62%, respectively. Adding 58s % starch and a further increase in its content causes a sharp increase in both the porosity of the skeleton and the decrease in their strength.

2. It is established that the strength of the ceramic cores decreases from 316.3 MPa to 11 MPa, with an increase in porosity from 19 to 62%, respectively. With the original starch content of 51% vol., The ceramic skeletons have the optimum ratio of strength and porosity, whose values are 92 MPa and 38%, respectively. The critically low strength values (21, 22.8, and 11 MPa) for skeletons with a source starch content of 58-, 64-, and 69-%, respectively, can be explained by the formation of large pores of  $\sim 10 \mu\text{m}$  in size, which in turn become additional stress concentrators at destruction.

3. It is found that the use of 3,5YSZ instead of 8YSZ for the manufacture of the anode of the ceramic fuel cell is advisable, since it allows to obtain higher values of durability at the same porosity 35-40%, sufficient for the operation of the fuel cell.

4. The technique of introducing nickel into the porous skeleton has been worked out. The influence of the number of cycles of impregnation of the skeleton by salts of nickel on the content of nickel is investigated. The influence of nickel quantity on the strength and conductivity of saturated skeletons has been investigated.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Optimization strategies for Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) application: A literature survey / F. Ramadhani, M.A.Hussain, H. Mokhlis [et al] // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. - vol. 76. - p. 460-484.
2. Singhal S. C. High-temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications / S. C. Singhal, K. Kendall // Elsevier: Oxford, U.K., 2003. – 406 p. – (ISBN 10: 1-85617-387-9, ISBN 13: 978-1-85617-387-2).
3. Marcia Zalbowitz Sharon Thomas. Fuel cells - green power. Los Alamos National Laboratory, 1:24, 1999.
4. Shri Prakash B. Properties and development of Ni/YSZ as an anode material in solid oxide fuel cell: A review / B. Shri Prakash, S. Senthil Kumar, S. T. Aruna // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. – 36. – P. 149–179.
5. S.C. Singhal, Solid oxide fuel cells for stationary, mobile, and military application //Solid State Ionics 152-153 (2002) pp. 405-410.
6. T. A. Ramanarayanan, S. C. Singhal, and E. D. Wachsman, High Temperature Ion Conducting Ceramics.// Electrochem. Soc. Interface, Summer (2001) pp. 22-27.
7. Nguyen Q. Minh, Review. Solid oxide fuel cell technology-features and applications.//Solid State Ionics 174 (2004) pp. 71–277.
8. A review on cell/stack design for high performance solid oxide fuel cells / B. Timurkutluk, C. Timurkutluk, M. Mat [et al] // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. – Vol. 56. – p. 1101-1121.
9. A review on cell/stack design for high performance solid oxide fuel cells / B. Timurkutluk, C. Timurkutluk, M. Mat [et al] // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. – Vol. 56. – p. 1101-1121
10. Frandsen H. L. Optimization of the strength of SOFC anode supports / H. L. Frandsen, T. Ramos, A. Faes, et al. // J. Europ. Ceram. Soc. – 2012. – Vol. 32 (5). – P. 1041–1052.



11. Effects of anode material and fuel on anodic reaction of solid oxide fuel cells / T. Setoguchi, K. Okamoto, K. Eguchi [et al] // Journal of Electrochemical Society, 1992. – Vol. 139. – p. 2875-2880.
12. Aruna S.T. Synthesis and properties of Ni-YSZ cermet anode material for solid oxide fuel cells / S.T. Aruna, M. Muthuraman, K.C. Patil. – Solid State Ionics, 1998. – Vol. 111. – p. 45-51.
13. Thermal expansion of nickel-zirconia anodes in solid oxide fuel cell during fabrication and operation. / M. Mori, T. Yamamoto, H. Itoh [et al] // Journal of Electrochemical Society, 1998. – Vol. 145. – p. 1374–1381.
14. Duran P. Processing and characterization of nickel oxide/zirconia composite prepared by polymeric complex solution synthesis / P. Duran, J. Tartaj, F. Capel // Journal of the European Ceramic Society, 2003. – Vol. 23. – p. 2125–2133.
- 15.S. Spasil, US Patent 3.558.360; filed October 30. 1964. Modified November 2. 1967. Granted March 31. 1970.
16. Wincewicz K. C. Taxonomies of SOFC material and manufacturing alternatives/ K. C. Wincewicz, J. S. Cooper // Journal of Power Sources, 2005. – 140. – p. 280–296.
17. Kawada T. Current electrolytes and catalysts / T. Kawada and J. Mizusaki // Handbook of fuel cells-fundamentals, technology and application, Eds.: W. Vielstich et al. Fuel Cell Technology and Applications, Wiley and Sons, Chichester, England, 2003. – Vol. 4 – p. 987.
18. Haile S. M. Fuel cell materials and components / S. M. Haile // Acta Materialia, 2003. – 51. – p. 5981– 6000.
19. Minh N. Q. Science and technology of ceramic fuel cells / N.Q. Minh, T. Takahashi. // Elsevier Science b.v. – Amsterdam, 1995. – 356 p.
20. Rado Influence of reduction conditions Influence of reduction conditionsvic M. Mechanical properties of tape cast nickel-based anode materials for solid oxide fuel cells before and after reduction in hydrogen / Radovic M., Lara-Curzio E. // Acta Mater., – 2004, – 52. – P. 5747–5756.

21. Kim S. Ni–YSZ cermet anode fabricated from NiO–YSZ composite powder for high-performance and durability of solid oxide fuel cells / S. Kim, H. Moon, S. Hyun // *Solid State Ionics*, 2007. – Vol. 178. – p. 1304–1309.
22. Influence of reduction conditions of NiO on its mechanical and electrical properties / Y. Brodnikovskiy, B. Vasyliv, V. Podhurska [et al.] // *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 2016. – Vol. 6 (1). – p. 113–121.
23. Mechanical strength and electrical conductivity of Ni–YSZ cermets fabricated by viscous processing / L. Grahl-Madsen, P.H. Larsen, N. Bonanos [et al.] // *Journal of Material Science*, 2006. – Vol. 41. – p. 1097–1107.
24. Бродніковський Є. М. Виготовлення остового аноду для керамічних паливних комірок та дослідження його механічної поведінки / Є. М. Бродніковський, М. М. Бричевський, В. І. Чедрик та ін. // *Електронная микроскопия и прочность материалов*. – К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2010. – 17. – с. 97-101.
25. Buyukaksoy A. Effect of porous YSZ scaffold microstructure on the long-term performance of infiltrated Ni–YSZ anodes / A. Buyukaksoy, S. Kammampata, V. Birss // *Journal of Power Sources*, 2015. – Vol. 287. – p. 349-358.
26. Fabrication and modification of solid oxide fuel cell anodes via wet impregnation/infiltration technique / Z.B. Liu, B.B. Liu, D. Ding [et al] // *Journal of Power Sources*, 2013. – Vol. 237. – p. 243-259.
27. ГОСТ 2409–2014. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. – М.: Стандартинформ, 2014.
28. Borger A. The ball on three balls test for strength testing of brittle discs – stress distribuon in the disc / A. Borger, P. Supancic, R. Danzer // *J. Europ. Ceram. Soc.* – 2002. – Vol. 22. – P. 1425–1436.
29. Danzer R. The ball on three balls test-Strenght and failure analysis of different materials / R. Danzer, W. Harrer, P. Supancic // *Ibid.* – 2007. – Vol. 27. – P. 1481–1485.

30. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Державні санітарні норми – К.: Міністерство охорони здоров'я України. Головне санітарно-епідеміологічне управління, 1999. – 34 с.
31. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Стандартинформ, 2008. – Дата введения 01.01.1989. – 49 с.
32. СН 245-71. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. – М.: Госстрой СССР, 1972. – Срок введения 1 апреля 1972 г. – 175 с.
33. НАПБ Б.07.005-86. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. – М.: ВНИИПО МВД СССР. – Введены в действие с 1 января 1987 г. – 24 с.
34. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок. – К.: Министерство труда и социальной политики Украины, 2001 – 80 с.
35. ИСО 3941-77. Пожары. Классификация. – Международная организация по стандартизации. – УДК 614.814.1. – 2 с.
36. НАПБ Б.03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К.: УкрНДІПБ МНС України, 2007. – 25 с.